

Moottorikelkkojen melun mallintaminen ja visualisointi

Topi Vellonen

791619S

Pro Gradu –tutkielma

Maantieteen tutkimusyksikkö

Oulun yliopisto

11.5.2020

Luonnontieteellinen tiedekunta

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö: Maantieteen tutkimusyksikkö		Pääaine: Maantiede	
Tekijä Vellonen Topi Lauri Taavetti		Opiskelija-numero: 2465410	Tutkiel-man sivumäärä: 57 s. + 8 liit.
Tutkielman nimi Moottorikelkkojen melun mallintaminen ja visualisointi			
Asiasanat:	Ääni, melu, melumallinnus, SPreAD-GIS, NMSIMGIS, ArcMap, GIS, QGIS, moottorikelkka, reittisuunnittelu		
Tiivistelmä Melu on yksi laajimmalle levinneistä saasteen muodoista ja se on osa lähes jokapäiväistä elämäämme jossain sen muodossa. Sillä on todistettusti myös negatiivinen vaikutus terveyteen. Euroopan unionin laatimien säädösten mukaan ympäristömelua tulee mitata ja kartoittaa alueilla, joissa altistuneiden määrä on merkittävä. Kaupunkiympäristöjen lisäksi melun vaikutusta säädellään myös harvemmin asutuilla alueilla ja luonto-olosuhteissa. Kyseisillä alueilla melun mallintaminen on kuitenkin hankalaa ja työkaluja on vaikeasti saatavilla. Esimerkiksi moottorikelkkareittien suunnittelussa olisi suuri tarve työkalulle, jolla melun mallintaminen olisi tehokasta. Myös tulosten visuaalinen esittäminen on erittäin tärkeää tulosten informatiivisuuden kannalta. Tämän opinnäytetyön tavoite on tarkastella valittujen mallinnusmenetelmien soveltuvuutta moottorikelkkojen melun mallintamiseen Suomessa. Oleellisessa asemassa tutkielman kannalta on myös vapaasti saatavien aineistojen käyttö mallinuksissa. Mallinuksisiin valitut työkalut ovat SPreAD-GIS sekä NMSIMGIS, jotka ovat osa Sound Mapping Toolbox -nimistä ArcMap -työkalupakkia. Mallinnusten toteuttamiseen käytettiin Esri:n ArcMap -ohjelmiston vanhaa versiota 10.4.1. Mallien suorittamista ja tarkastelua varten muodostettiin Python-skriptit ja mallinnusten tuloksia vertailtiin Ympäristöministeriön vuonna 2007 teettämiin moottorikelkkojen melumittauksiin. SPreAD-GIS:n tulokset poikkesivat huomattavasti NMSIMGIS:n tuloksista. Melutasot olivat SPreAD-GIS:n osalta matalampia verrattuna NMSIMGIS:siin. NMSIMGIS:n tulokset taas olivat etenkin kiihdytyksen enimmäisäänitasojen osalta todenmukaisia ja poikkeama vertailtuarvoihin oli hyvin vähäistä. Safariajojen mallinuksissa poikkeamat olivat suurempia kummankin mallinnusmenetelmän osalta. Mallinnukset osoittavat etenkin sen, että SPreAD-GIS ei tämän opinnäytetyön tulosten mukaan sovellu suoranaisesti moottorikelkkojen melun mallintamiseen. NMSIMGIS sen sijaan oli tuloksiltaan lupaava. Kummankin mallinnusmenetelmät vaativat lisätestauksia ja kalibrointia esimerkiksi uusien maastomittauksien avulla.			
Päiväys:	Rovaniemellä, 11.05.2020		

Sisällys

1. Johdanto	4
2. Ääni ja melu	7
2.1 Ääni	7
2.2 Äänen leviäminen ja vaimentuminen	8
2.3 Melu	10
2.4 Melun terveysvaikutukset	11
2.5 Melun vaikutus eläimiin	13
3. Moottorikelkka melunlähteenä	13
4. Moottorikelkkojen melumittaus ja standardit Suomessa	16
5. Melumallinnuksessa käytettävät työkalut	18
5.1 Työkaluista yleisesti	18
5.2 SPreAD-GIS	21
5.3 NMSIMGIS	23
6. Aikaisemmat tutkimukset	24
7. Tutkimusalueet	25
7.1 Valkiaisnevan alue	26
7.2 Kankarinjärven alue	27
8. Aineisto ja menetelmät	28
8.1 Digitaalinen korkeusmalli	28
8.2 Melunlähteet	28
8.3 Melunlähteiden ominaisuudet	28
8.4 Mallinnusalue	29
8.5 Maanpeite	29
8.6 Sääolosuhteet	30
8.7 Ympäristöministeriön mittausaineisto	31
8.8 Mallinnusasetelma	31
9. Tulokset	34
9.1 Kiihdytyksen enimmäisäänitaso	35
9.2 Safariajot	43
10. Pohdinta	47
11. Yhteenveto	50
12. Haasteet	51
Lähteet	52
Liitteet	58

1. Johdanto

Melu on yksi yleisimmistä sekä laajimmalle levinneistä saasteista ja sen rooli yhdyskuntasuunnittelussa on kasvanut huomattavasti viimeisen 40 vuoden aikana (WHO 2011; Morillas ym. 2018). Melu mainittiin oleellisena saasteen muotona jo vuonna 1972 (YK 1972: 8). Euroopan ympäristökeskuksen (EEA) (2019) mukaan vuonna 2017 Euroopassa arviolta jopa yli 140 miljoona ihmistä altistui suositusarvot ylittävälle liikenteen melulle. Pelkästään Suomessa liialliselle melulle altistuvia oli noin 600 000. Ympäristömelun arvioidut taloudelliset vaikutukset ovat myös huomattavia. Euroopan unionissa melusta aiheutuneiden kustannusten on arvioitu vuonna 2005 olleen 0.2-2.0 prosenttia bruttokansantuotteesta, eli yli 12 miljardia euroa (Euroopan komissio 1996). Melun kartoittamiseksi on Euroopan unionissa muodostettu direktiivi vuonna 2002, jonka mukaan melua on kartoitettava etenkin suuremmissa väestökeskittymissä sekä tie-, lentokone- ja raideliikennealueilla, joissa liikennemäärät ovat suuria. Direktiivin mukaan tietojen tulee olla julkisia ja kartoituksia on tehtävä säännöllisin väliajoin (Euroopan parlamentin... Direktiivi 2002/49/EY). Meluun liittyvä lainsäädäntö sekä tutkimukset ovat pääasiassa liittyneet erilaisista motorisoiduista liikennemuodoista johtuvaan meluun kaupunkialueilla, kuten lentoliikenteeseen sekä tieliikenteeseen. Fokus on kuitenkin hiljalleen siirtynyt muihin tilanteisiin, kuten esimerkiksi ekologisten vaikutusten tarkasteluun ja harvaan asuttujen alueiden meluolosuhteisiin (esim. Larson ym. 2016; Gozalo & Morillas 2017). Harvaan asutuilla alueilla ja luonto-olosuhteissa vaikutus painottuu sekä ihmisiin että eläimiin, minkä vuoksi melun arviointi on kyseisillä alueilla oleellista ja tärkeää. Myös yksittäisen melunlähteen vaikutus korostuu (Knight & Gutzwiller 1995; Proto ym. 2016: 847).

Ympäristömelun terveysvaikutuksia on tutkittu paljon ja vaikutusten on todistettu olevan hyvin laajoja ja monimuotoisia (WHO 2011). Etenkin kaupunkialueilla melun vaikutukset korostuvat (Morillas ym. 2018: 208). Melun on todistettu vaikuttavan ainakin kuuloon (Lewis ym. 2013), unen laatuun (Muzet 2007), sydän- ja verisuonisairauksien esiintymiseen (Ndrepepa & Twardella 2011) ja esimerkiksi mielenterveyteen (Stošić & Blagojević 2011). Melun vaikutuksia eläimiin on tutkittu myös enenevässä määrin ja on huomattu, että melu vaikuttaa negatiivisesti yksilöiden väliseen kommunikaatioon sekä esimerkiksi poikasten kehitykseen (Parks ym. 2007;

Injaian ym. 2018). Harvaan asutuilla alueilla ja luonto-olosuhteissa hyvin usein melun lähteenä toimivat erilaiset maastossa liikkumiseen erikoistuneet moottoriajoneuvot, kuten mönkijät, moottorikelkat sekä moottoriveneet (Knight & Gutzwiller 1995). Kyseisten ajoneuvojen yleistynyt käyttö avaa uusia näkökulmia melun kartoittamiseen. Kaupunkialueista poiketen on otettava huomioon kasvillisuus, maanpinnan muotojen vaihtelu sekä esimerkiksi ihmisten ja muiden eliöiden toisistaan poikkeavat kuulo-ominaisuudet (Lohr ym. 2003; Reed ym. 2017).

Moottorikelkkojen reittisuunnittelussa noudatetaan Suomessa valtioneuvoston päätöksen (993/92) asettamia melun ohjearvoja (Valtioneuvoston... ohjearvoista 993/1992 1992). Melua koskevien ohjearvojen pohjalta on muodostettu suojaetäisyydet, joita moottorikelkkareittiä perustettaessa tulee noudattaa. Suojaetäisyyden pituus riippuu pääasiassa perustettavan reitin läheisyydessä olevan asutuksen luonteesta. Etäisyyteen vaikuttavat myös ekologiset tekijät, kuten biodiversiteetin kannalta olennaiset lajit ja niiden pesimäalueet (Päivänen ym. 2009: 28, 30). Luontokohteiden melutasojen arviointiin tai mallintamiseen on hyvin vähän työkaluja tai saatavilla olevat vaihtoehdot ovat maksullisia. Työkalut ovat hyvin usein myös toiminnallisuudeltaan vajavaisia, eivätkä ne ota huomioon monia luonto-olosuhteissa oleellisia tekijöitä. Reittisuunnittelussa olisi tarve työkalulle, jonka avulla kelkkojen aiheuttamaa melua voitaisiin mallintaa tehokkaasti. Tähän liittyy myös oleellisesti saatujen tuloksien informatiivinen esittäminen visuaalisesti (Jarmo Rinkinen, suullinen tieto 2020). Kaupunkialueiden melumallinnuksessa on ollut havaittavissa yhä enemmän siirtymistä avoimen lähdekoodin ohjelmistoihin, mikä on lupaava kehityksen suunta myös luonto-olosuhteisiin kohdistuvan melumallinnuksen näkökulmasta (esim. Biagi ym. 2001; Bocher ym. 2019). Tässä opinnäytetyössä käytettävät mallinnusmenetelmät ovat itsessään avoimen lähdekoodin alaisia, mutta ne vaativat toimiakseen maksullisen Esri:n ArcMap -ohjelmiston.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on pohtia meluun liittyviä teemoja yleisesti ja paneutua lopulta tarkemmin melumallinnukseen ja siihen liittyviin työkaluihin. Pääasialliset tarkastelun kohteet ovat moottorikelkkojen melun mallinnus ja mallinnustulosten visuaalinen ilme. Aluksi käydään läpi aiheeseen liittyvää teoriaa koskien ääntä ja melua. Seuraavaksi esitellään melun terveysvaikutuksia sekä ihmisiin

että eläimiin. Tämän jälkeen tarkastellaan moottorikelkkaa melunlähteenä ja moottorikelkkojen melumittauksiin liittyviä standardeja sekä lainsäädäntöä. Seuraavaksi käydään läpi joitain melumallinnuksen työkaluja niiden toimintaperiaatteen selkeyttämiseksi, minkä jälkeen esitellään tässä opinnäytetyössä käytettävät melumallinnustyökalut. Mallinnusalueiden sekä käytettävien aineistojen esittelyn jälkeen käydään läpi tulokset, pohdinta, yhteenveto sekä työn tekemisen aikana esiintyneet haasteet. Opinnäytetyön pääasiallinen tavoite on selvittää tarkasteltavien melumallinnustyökalujen soveltuvuutta moottorikelkkojen melumallinnukseen. Työssä selvitetään myös erilaisten avointen aineistojen soveltuvuutta kyseisten mallinnustyökalujen käyttöön sekä pohditaan, miten menetelmiä voitaisiin kehittää tulevaisuudessa.

2. Ääni ja melu

2.1 Ääni

Akustisessa signaalissa on kyse äänestä. Ääni on värähtelyn tuottama aaltosignaali, joka voi kulkea elastisissa aineissa, kuten esimerkiksi ilmassa ja vedessä. Ilmassa sen nopeus on noin 340 metriä sekunnissa, kun taas vedessä nopeus on huomattavasti suurempi, noin 1500 metriä sekunnissa. Kulkiessaan ääniaallot kuljettavat energiaa, joka saa esimerkiksi ihmisen korvan reagoimaan (Hastings 1960: 15; Dowling & Williams 1983: 11). Aallon värähtelyn tiheys määrää äänen korkeuden. Mitä tiheämpi värähtely, sitä korkeampi ääni. Äänen värähtelyn tiheyttä kuvatessa puhutaan yleisesti äänen taajuudesta, jonka yksikkö on hertsi (Hz). Usein äänen taajuus (*frequency*) ja äänen korkeus (*pitch*) mielletään samaa tarkoittavana asiana, mutta todellisuudessa taajuus viittaa ääniaaltoihin, joita äänen lähde muodostaa, kun taas äänen korkeudella tarkoitetaan ihmisen kuulotuntemuksen tuottamaa kokemusta äänestä. Kuulotuntemus ei välttämättä ole aina taajuutta tarkastellessa todenmukainen (Hastings 1960: 15). Muita äänen ominaisuuksia ovat sen paine (N/m^2) sekä intensiteetti (W/m^2). Ihmisen terve kuulo aistii ääntä taajuusvälillä 20-20000 Hz ja erityisen tarkasti ihminen kuulee äänet taajuusvälillä 2000-8500 Hz. Eläimillä kuuloalueet vaihtelevat usein lajeittain ja jopa lajien sisäisesti (Lohr ym. 2013). Hyvin yleisesti ääntä ja sen voimakkuutta esitetään desibelien (dB) avulla. Desibeli ei kuitenkaan ole absoluuttinen yksikkö, vaan mitatun äänenpaineen suhde vertailuarvoon (De & De 2009: 103-104). Yleisesti ympäristömelua mitataan painotettujen desibelien avulla. Painotuksia on erilaisia, mutta useimmiten käytössä on ollut niin sanottu A-painotus dB(A).

Äänen ja sitä kautta melun yksi keskeisimmistä ominaisuuksista on sen voimakkuuden vaihtelu ajassa, minkä takia on olennaista saada käsitys melusta ja sen määrästä tietyllä aikavälillä. Tämä pätee etenkin kaupunkialueilla, missä melu on jatkuvasti läsnä. Tähän tarkoitukseen käytetään merkintää LAeq, joka tarkoittaa A-painotettua melutasoa tietyllä aikavälillä mitattuna. Kyse on siis eräänlaisesta keskiarvosta (Bentes & Slama 2011: 296). Painotusten tarkoituksena on soveltaa melumittauksia ihmisen kuulo-ominaisuuksien mukaisiksi. A-painotus soveltuu hyvin tilanteisiin, joissa melutaso on matala. Tilanteissa, joissa melutaso on korkea, olisi hyvä

käyttää vastaavasti C-painotusta melumittauksia suoritettaessa (Weiner ym. 2003: 431-432). Äänen A-painotus tarkoittaa käytännössä sitä, että jokaisen mitatun taajuusalueen arvot painotetaan niin, että lopputuloksena saadaan äänenpainearvoja, jotka ottavat huomioon ihmiskuulon herkkyyden kullakin taajuusalueella. Painotus on niin laajasti käytössä äänitasoihin kohdistuvissa mittauksissa, että se on usein automaattisesti saatavilla käytettävissä mittauslaitteissa, mikä tekee sen käytöstä nykypäivänä hyvin helppoa. Joskus kuitenkin muut painotustavat ovat välttämättömiä, kuten esimerkiksi lentokoneiden melua mitattaessa. Lentokoneiden kohdalla käytetään *perceived noise* desibelejä (PNdB). PNdB ottaa huomioon etenkin lentokoneiden hyvin korkeataajuisen melun (Dowling & Williams 1983: 32-33).

2.2 Äänen leviäminen ja vaimentuminen

Ääni ja tämän tutkielman tapauksessa pääasiassa melu leviävät eri tavoin riippuen melunlähteen tyypistä. Pistemäisestä melunlähteestä, kuten esimerkiksi moottorikelkasta, ääni leviää pallomaisessa muodossa joka suuntaan. Linjamaisesta kohteesta ääni taas leviää sylinterimäisesti (Borenus ym. 1981: 38-39). Pistemäisessä kohteessa etäisyyden kaksinkertaistuu äänenpainetaso laskee noin 6 dB ja kymmenkertaistuu painetaso laskee noin 20 dB. Äänenpaineen taso laskee siis logaritmisesti (Borenus ym. 1981: 38-39). Äänisignaalin kulkuun vaikuttaa oleellisesti myös muita vaimentavia tekijöitä, jotka liittyvät pääasiallisesti väliaineeseen, jossa ääniaallot kulkevat. Väliaineesta johtuvat vaimennustekijät voidaan jakaa kolmeen eli lämmönsiirtymisvaimennukseen, viskositeettivaimennukseen sekä molekyylivaimennukseen. Näistä kolmesta molekyylivaimennuksella on suurin vaikutus äänen vaimentumiseen. Lämmönsiirtymisvaimennuksessa ääniaallon tuottamat pienet painenvaihtelut aiheuttavat paikallisia lämpötilamuutoksia, joiden tasoittumisella on vaimentava vaikutus äänisignaaliin. Viskositeettivaimennuksella tarkoitetaan väliaineen synnyttämän kitkan vaimentavaa vaikutusta. Molekyylivaimentumisessa tapahtuu molekyyli-energiäsiirtymistä. Tämä vaimentuminen on paljolti riippuvainen ilmankosteudesta ja happi- sekä vesimolekyylien vuorovaikutuksesta. Ilman absorptiovaimennuksen voimakkuus riippuu monesta eri tekijästä, kuten äänen taajuudesta ja erinäisistä

meteorologisista suureista (Lahti 1979: 3-5). Taulukosta 1 voidaan huomata, että absorptiovaimennuksen voimakkuus kasvaa korkeammilla taajuuksilla (Borenus ym. 1981: 40-41).

Taulukko 1. Ilman absorptiovaimennus (dB) 1 km:n matkalla lämpötilan ollessa 20°C (Borenus ym. 1981: 41).

Suhteellinen kosteus (%)	Taajuus (Hz)				
	500	1000	2000	4000	8000
0	0.03	0.1	0.5	2.1	8.3
30	2.1	5.1	13	41	143
50	1.8	4.2	10	26	83
90	1.4	4.4	8.4	21	54

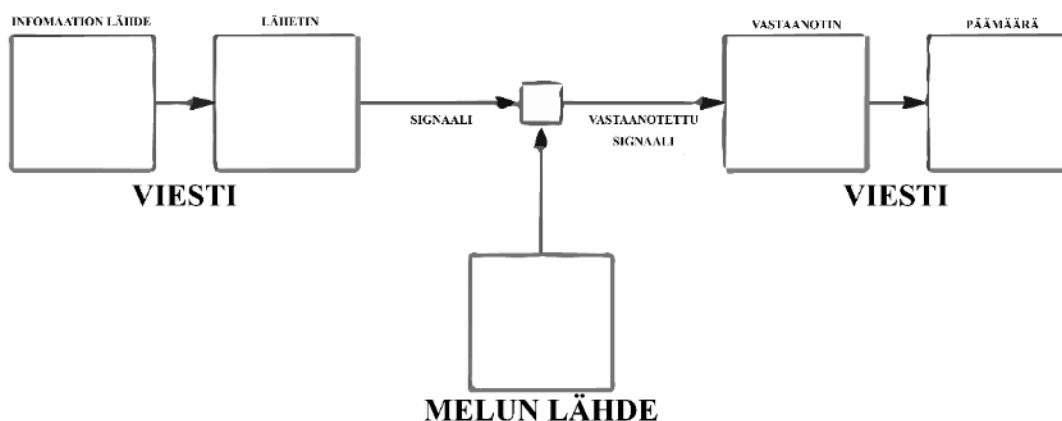
Väliaineen absorptiovaimennuksen lisäksi ilmassa liikkuvaan ääniaaltoon kohdistuu myös muita vaimentavia ja vääristäviä tekijöitä, kuten lämpötilan vaihtelut ilmakehässä sekä tuulet. Koska äänen nopeus riippuu ilman lämpötilasta, on selvää, että ääniaallot eivät kulje suorassa horisontaalisessa tasossa, vaan ne taittuvat lämpötilan muutosten mukaisesti. Mikäli maanpinnan tasossa lämpötila on matalampi kuin ylöspäin mentäessä, ääniaallot taittuvat kohti maanpintaa. Käänteisessä tapauksessa ääniaallot taittuvat ylöspäin, jonka seurauksena syntyy pitkällä etäisyyksillä varjoalueita. Tuulen vaikutus näkyy ääniaaltojen kulussa niin, että myötätuuleen kuljettaessa ääniaallot taittuvat alaspäin ja vastatuuleen ylöspäin (Lahti 1979: 39-44; Borenus ym. 1981: 42-44).

Ilmakehän ja sen ilmiöiden vaikutusten lisäksi ääniaaltojen kulkuun vaikuttavat myös erinäiset esteet sekä geometriat. Tällaisia voivat olla esimerkiksi kasvillisuus ja rakenteet, jotka ovat ääniaallon tiellä. Rakennetussa ympäristössä, jossa asutusta on esimerkiksi runsaan liikenteen läheisyydessä, käytetään tietoisesti hyväksi melua estäviä rakenteita. Erilaiset objektit ääniaallon tiellä muuttavat äänen kulkua eri tavoin riippuen pitkälti kohteen rakenteesta, koostumuksesta sekä koosta. Ääniaallon aallonpituudella on myös oleellinen merkitys. Mikäli aallonpituus on suuri verrattuna kohdattuun esteeseen, on vaikutus ääniaallon kulkuun hyvin pieni ja päinvastoin. Esteet

ääniaallon tiellä aiheuttavat usein vain osittaista aallon taipumista, eli vain tietyt taajuualueet taipuvat (Borenus ym. 1981: 47-48).

2.3 Melu

Melu on signaali, joka häiritsee kommunikaatiota. Avain melun mittaamiseen ja havainnointiin on ymmärtää vastaanottajan rooli kommunikaatioketjussa, minkä kautta on mahdollista arvioida melun aiheuttaman informaatiokadon määrää (Shannon 1948: 20). Yksinkertaisessa kommunikaatiojärjestelmässä on signaalin lähettäjä, vastaanottaja ja niiden välissä signaaliketjussa ilmenevä melu. Vastaanottajalle siirtyy signaali, joka on melulähteen vaikutuksen alainen, jolloin signaalin sisältö voi olla alkuperäiseen nähden muuntunut (Kuva 1).



Kuva 1. Yksinkertaistettu kuvaus kommunikaatioketjusta (Shannon 1948: 2).

Melu voi olla liian kova signaali, jolloin välitetty informaatio peittyy melun alle. Se voi olla myös taajuualueeltaan alkuperäisen signaalin mukainen, jolloin myös tapahtuu välitetyn informaation peittymistä (Munjal 2013: 1). Sama periaate soveltuu melun kuvaamiseen, oli kyse sitten elektronisesta melusta (kohina) tai akustisesta äänestä. Perinteisesti melulla tarkoitetaan ääntä, joka on jollain tapaa häiritsevää tai haitallista. Melua esiintyy monessa eri muodossa, mutta yhteistä näillä melun muodoilla on se, että

ne aiheuttavat altistuvassa yksilössä jonkinlaisia negatiivisia oireita tai tuntemuksia (Pepper ym. 2006: 356).

Wiley (2015: 11-12) kuvailee melua ja sen vaikutusta kommunikaatioon lintujen ääntelyn avulla. Lintujen laulaessa muodostettu ääni on hyvin erilainen verratessa ääntä äänen lähteessä ja sen kohteessa. Äänisignaaliin vaikuttavat äänen hajonta ja kaiku luonnon eri pinnoista. Luonnossa on myös monia muita eliöitä, jotka käyttävät kommunikaatioon ääntä. Myös esimerkiksi vesi aiheuttaa laajan taajuusalueen melua, joka peittää alleen eliöiden tuottamia ääniä. Ratkaisuna linnut tuottavat hyvin kapean taajuusalueen ääntä ja keskittyvät muodostamaan ääntä suurella voimakkuudella. Niin sanotun taustamelun luonne on pitkälti riippuvainen olosuhteista, eli kaupunkiympäristössä syntyvä taustamelu on usein taajuuksiltaan hyvin erilaista verrattuna luonto-olosuhteisiin (Lohr ym. 2003).

Ihmisiin kohdistuva melu on pääasiassa antropogeenista melua, jonka vaikutus korostuu etenkin suurissa väestökeskittymissä, joissa melunlähteet ovat sijoittuneet pienelle alueelle. Meluun vaikuttaa oleellisesti myös melun luonne, eli se voi olla kova yksittäinen signaali tai kokoelma ääniä monilla eri taajuusalueilla. Oleellista on myös se, että onko melu jatkuvaa vai hetkittäistä (Weiner ym. 2003: 437-440). Ihan niin kuin linnuilla, myös ihmisillä melu aiheuttaa kommunikaatiossa erilaisia häiriöitä. Best ym. (2020) kuvaavat kaksi erilaista tapaa, joilla melu häiritsee ihmisten välistä kommunikaatiota. Ensimmäinen on niin sanottu *energetic masking* (EM), joka tarkoittaa ääniä, jotka peittävät osia välitetystä informaatiosta. Toisena on *informational masking* (IM), joka taas tarkoittaa ääntä, joka ohjaa kuuntelijan huomiota pois varsinaisesta kuuntelun kohteesta. On huomioitava myös se, että melun kokeminen on täysin subjektiivinen kokemus. Jotkin yksilöt voivat olla huomattavasti herkempiä melulle kuin toiset (Dowling & Williams 1983: 26).

2.4 Melun terveysvaikutukset

Meistä jokainen on altistuneena melulle lähes joka päivä sen eri muodoissa. Melun luonne ja määrä riippuvat pitkälti siitä minkälaisessa ympäristössä olemme, mitä teemme ja mikä

kellonaika on kyseessä. Suurissa kaupungeissa ja niiden ympärillä etenkin moottoriavusteinen liikkuminen aiheuttaa suurimman osan melusta. Melun lähteenä toimivat pitkälti ajoneuvojen moottorit sekä renkaiden tuottama ääni (Muzet 2007: 136).

Normaali keskustelu metrin etäisyydellä toisesta ihmisestä tuottaa ääntä noin 65 dB voimakkuudella. 125 dB ääni voi tuottaa ihmiselle kipua. Muita melutasoja voidaan tarkastella taulukosta 2. Etenkin pitempään jatkunut yhtäjaksoinen altistuminen melulle voi aiheuttaa ainakin väliaikaista kuulokynnyksen alenemista. Käytännössä siis ihmisen kuulo heikkenee hetkellisesti ja toistuvat vastaavat altistumiset voivat aiheuttaa pysyviä vaurioita. Melulla voi olla myös kuulon muutosten lisäksi muita vaikutuksia, sekä psyykkisiä, että fyysisiä. Taajuusalueesta riippuen melu voi aiheuttaa pahoinvointia, huimausta tai pahimmassa tapauksessa jopa vaikuttaa aivojen tai hermoston toimintaan (Weiner ym. 2003: 437-440; De & De 2009: 106-107). Ndrepepa & Twardella (2011) todistivat tutkimuksessaan liikennemelun vaikutuksesta sydän- ja verisuonisairauksiin, että ihmisillä, jotka altistuivat runsaalle melulle, oli jopa yli 15 % suurempi riski sairastua keuhkoverenpainetautiin ja 7 % suurempi riski sairastua sepelvaltimotautiin.

Taulukko 2: Melutasoja eri tilanteissa (Starck & Teräsvirta 2009).

Melutaso (dB)	Esimerkkutilanne
0	Kuulokynnys
5-25	Pensaiden lehtien havina
25-50	tietokone, tuuletin
50-70	äänekäs puhuminen
70-85	liikenne, ruohonleikkuri
85-90	moottoripyörä, sirkkeli
90-110	disko, paineilmatyökalut
110-130	kipukynnys, ilotulitus

Työpaikoissa, joissa työntekijät ovat jatkuvasti altistuneena melulle, voi ilmetä heikentynyttä työtehokkuutta sekä kasvanutta tapaturma-alttiutta. Melu vaikuttaa asuinalueilla ihmisten unenlaatuun ja lapsilla varhaisessa vaiheessa tapahtuva altistuminen melulle voi aiheuttaa kehityshäiriöitä. Melun vaikutukset ovat siis laajoja ja se onkin yksi suurimmista jokapäiväisen stressin ja uupumuksen aiheuttajista tiheään asutuilla alueilla (De & De 2009: 106-107; Hume ym. 2012).

2.5 Melun vaikutus eläimiin

Keskittyminen harvemmin asutuille alueille on melututkimuksen osalta ollut verrattain vähäistä. Antropogeenisen melun vaikutusta eläimiin on tutkittu kuitenkin jonkin verran. Etenkin melun vaikutus lintuihin ja niiden käyttäytymiseen on ollut yleinen aihe aikaisemmissa tutkimuksissa. Melun vaikutukset ovat tutkimusten mukaan olleet hyvin moninaisia aina syntyneiden poikasten koon muutoksista munien kuoriutumisen heikkenemiseen (Injaian ym. 2018; Kleist ym. 2018; Campbell ym. 2019). On havaittu myös, että moottoriajoneuvoista johtuva melu ja sen vaikutus eläimiin ei välttämättä ole yhtä suurta verrattuna ei-motorisoituihin aktiviteetteihin. Motorisoitu toiminta luonnossa tosin aiheuttaa laajan spatiaalisen skaalan häiriötä, mikä on useissa tutkimuksissa jäänyt huomiotta (Larson ym. 2016: 15-16).

Melu vaikuttaa etenkin eläimiin, joiden oma kommunikointi häiriintyy liian suuren taustamelun takia. Tällaisia vaikutuksia on huomattu sekä linnuissa että esimerkiksi valaissa. Eläinten reaktio suureen meluun on usein oman kommunikaation muokkaaminen kuuluvammaksi (Parks ym. 2007: 7; Rolland ym. 2012; Wiley 2015: 11-12). On kuitenkin otettava huomioon, että eläimet voivat tottua kuulemiinsa ääniin siinä missä ihmisetkin. Eli ei voida suoraan olettaa, että esimerkiksi moottorikelkan tuottama ääni, joka luonnonolosuhteissa kuuluu hyvinkin kauas, olisi automaattisesti häiritsevämpi ääni, kuin esimerkiksi ihmisten nauru tai puhe. On siis oleellista ymmärtää äänen voimakkuuden lisäksi se, mitä ääni eläimelle merkitsee (Knight & Gutzwiller 1995: 113).

3. Moottorikelkka melunlähteenä

Liikennekäytössä olevien moottorikelkkojen määrä Manner-Suomessa on ollut jo vuosien ajan laskusuuntainen. Vuoden 2019 lopulla liikennekäytössä olevia moottorikelkkoja oli 76 388 kappaletta, kun taas vielä vuoden 2010 lopulla määrä oli huomattavasti suurempi, eli 104 896 kappaletta (Liikennekäytössä... 2008-2020 2020). Tosin rekisteröityjen moottorikelkkojen määrä on ollut nousussa (Rekisterissä... kunnittain 2020). Vähentynyttä moottorikelkkailua on pyritty selittämään esimerkiksi ilmaston lämpenemisen kautta. Lämpenemisen seurauksena lumen määrä on vähentynyt

ja yhä harvemmat alueet sekä ajankohdat soveltuvat moottorikelkkailuun. Tulevaisuudessa tilanne voi huonontua vielä entisestään (Scott ym. 2008). Moottorikelkoissa on tapahtunut myös kehitystä ja viime vuosina on uutena lisäyksenä tullut niin sanotut raskaat moottorikelkat, jotka mahdollistavat suurempien väkijoukkojen kuljettamisen samalla kulkuneuvolla. Tämä vähentää useamman moottorikelkan tarvetta esimerkiksi matkailuyrittäjien safaritoiminnassa (Jättimäiset... ryhmä kerralla 2019). Raskaiden moottorikelkkojen osalta on vuonna 2018 tehty esitys lakimuutoksesta, joka mahdollistaisi nykyistä raskaampien moottorikelkkojen käytön niille soveltuvilla ja erikseen merkityillä reiteillä (Hallituksen... laeiksi HE 185/2018 2018). Raskaat moottorikelkat tuovat melumallinnukseen uusia puolia, jotka on otettava huomioon tulevaisuudessa.

Pääasialliset melunlähteet moottorikelkassa ovat moottori, tela sekä pakoputki. Pakoputki on melunlähteistä suurin, sitten tela ja viimeisenä moottori. Moottorikelkoista peräisin olevan melun määrä on vähentynyt vuosien mittaan huomattavasti, etenkin kun nelitahtisten moottorien käyttö moottorikelkoissa on lisääntynyt kaksitahtisten tilalla. Muutoksen mukana on tullut vähennyksiä myös kelkkojen päästömääriin (Miers ym. 2000: 1896). Melumittauksissa on kuitenkin huomattavissa ristiriitoja, sillä esimerkiksi Liikosen ym. (2007) tekemissä melumittauksissa ei päästy tulokseen, joka osoittaisi melun määrän vähentyvän siirryttäessä kaksitahtisesta nelitahtiseen moottoriin.

Tulevaisuudessa melupäästöt voivat pienentyä lähes olemattomiin sähkömoottorikelkkojen myötä. Tänä päivänä Suomessa sähkömoottorikelkkoja on käytössä jo joissakin matkailuun keskittyvissä yrityksissä, mutta yleisesti käyttö on vielä hyvin rajallista (Moottorikelkka... sähkökelkkasafari 2018). Moottorikelkoista on olemassa myös hybridiversioita, joiden on todistettu olevan hieman hiljaisempia, kuin esimerkiksi yleiset neljätahtisella moottorilla varustetut kelkat (Kuyek & Perkins 2012). Tosiasia on kuitenkin se, että vielä monta vuotta eteenpäin pääasialliset liikennekäytössä olevat moottorikelkat ovat polttomoottoreilla varustettuja, joten melun rooli esimerkiksi reittisuunnittelussa on vielä kauan hyvin oleellisessa asemassa.

Moottorikelkkojen melun raja-arvot on säädetty Liikenne- ja

viestintäministeriön toimesta. Traktorien, moottorityökoneiden ja maastoajoneuvojen, niiden perävaunujen sekä hinattavien laitteiden rakenteesta ja varusteista koskevan säädöksen 1251/2002 (2002) §49 mukaan ”Moottorikelkassa on oltava tehokas äänenvaimennin. Moottorikelkan äänen voimakkuus, mitattuna standardin SAE J192A mukaisesti, ei saa ylittää 78 dBA”. Itse kohteeseen kohdistuvan säädöksen lisäksi moottorikelkkojen melua säädellään Valtioneuvoston päättämien melun ohjearvojen mukaisesti. Taulukosta 3 voidaan tarkastella melun ohjearvoja sekä ulko- että sisätiloissa.

Taulukko 3: Melun ohjearvot (Valtioneuvoston... ohjearvoista 993/1992 1992 Liikosen & Raution 2004 mukaan).

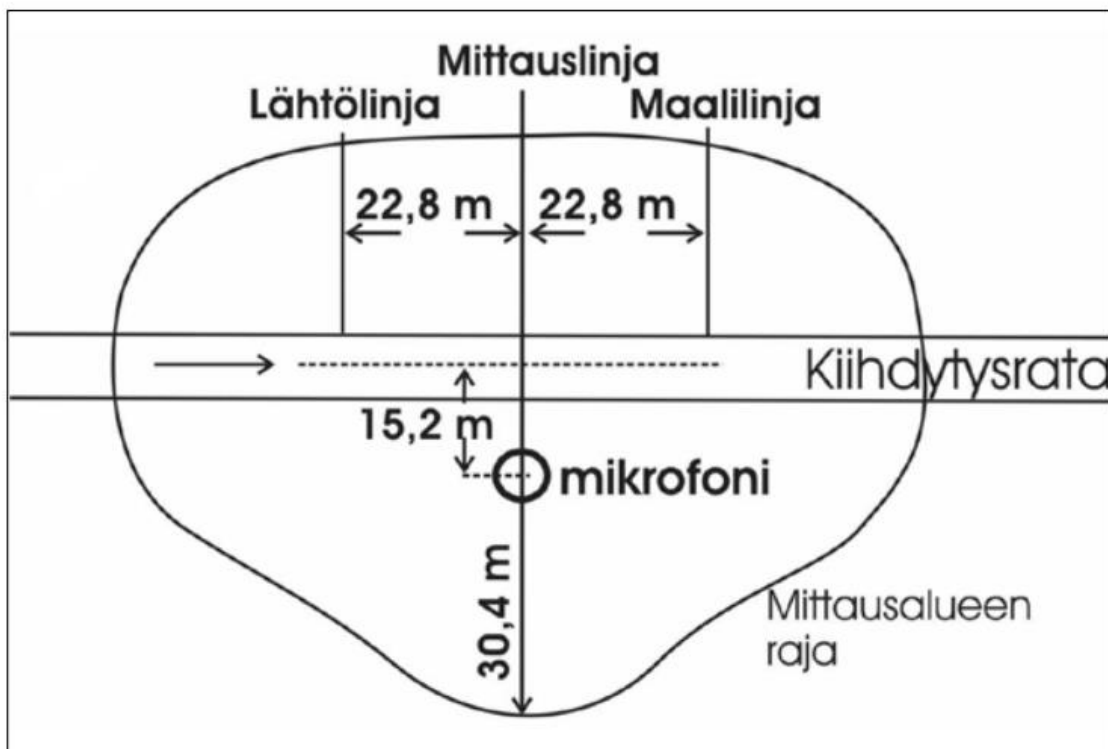
Ohjearvot ulkona	Päivä L _{Aeq} (7.00-22.00)	Yö L _{Aeq} (22.00-7.00)
Asumiseen käytettävät alueet, virkistysalueet taajamissa ja niiden välittömässä läheisyydessä sekä hoito- ja oppilaitoksia palvelevat alueet	55 dB	45-50 dB ^{1,2}
Loma-asumiseen käytettävät alueet, leirintäalueet, virkistysalueet taajamien ulkopuolella ja luonnonsuojelualueet	45 dB	40 dB ^{3,4}
Ohjearvot sisällä		
Asuin-, potilas- ja majoitushuoneet	35 dB	30 dB
Opetus- ja kokoontumistilat	35 dB	
Liike- ja toimistohuoneet	45 dB	
1. Uusilla alueilla melutason ohjearvo yöaikana on 45 dB 2. Oppilaitoksia palvelevilla alueilla ei sovelleta yöohjearvoa 3. Yöohjearvoa ei sovelleta sellaisilla luonnonsuojelualueilla, joita ei yleisesti käytetä oleskeluun tai luonnon havainnointiin yöllä. 4. Loma-asumiseen taajamissa voidaan kuitenkin soveltaa asumiseen käytettävien alueiden ohjearvoa		

Taulukosta voidaan nähdä, että A-painotettu melun ekvivalenttitason ohjearvo päivällä ulkotiloissa on 55 dB. Loma-asumiseen käytettyjen alueiden ohjearvo taas on 45 dB. Yöllä melun ohjearvot ovat matalampia eli 45-50 dB ja loma-asuntoalueilla 40 dB. Hervan (2000) mukaan tilanteissa, joissa moottorikelkkauran sijoittaminen maastoon on jokseenkin vapaata, olisi tärkeää, että sen etäisyys asutuksesta olisi vähintään 100 metriä. Tiiviillä kaava-alueilla urat olisi suunniteltava niin, että etäisyys asutukseen ei alittaisi 50 metriä. Moottorikelkkaliikenteen määrästä riippuen etäisyydet asutuksesta voivat olla poikkeustilanteissa myös edellä mainittuja lyhyempiä.

4. Moottorikelkkojen melumittaus ja standardit Suomessa

Liikosen ym. (2007) mukaan Suomessa käytetään moottorikelkkojen melumittauksissa Yhdysvalloista peräisin olevan SAE-J192-standardin sekä SAE-J1161-standardin mukaisia käytänteitä. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on mallintaa kyseisten standardien mukaisten mittausten pohjalta moottorikelkoista aiheutuvaa melua käyttäen hyväksi Yhdysvaltain maatalousministeriön metsäosaston muodostamaa SPreAD (System for the Prediction of Acoustic Detectability) -mallia sekä NMSIMGIS-mallia. NMSIMGIS on GIS-ympäristöön muodostettu työkalu Noise Model Simulation (NMSim) algoritmeista (Harrison ym. 1980; Reed ym. 2017: 56). Molemmat työkalut ovat osa Sound Mapping Toolbox (SMT) ArcMap -työkalupakkia.

Standardien mukaan melun mittaus tapahtuu 15,2 metrin päästä ajoradan keskiviivasta (kuva 2). Mikrofonin tulee olla 1,2 m korkeudella lumen pinnasta eikä mittausalueella saa olla alle 30 metrin etäisyydellä ääntä heijastavia pintoja. Irtolunta saa maastossa olla enintään 75 mm, jonka alla tulee olla vähintään 50 mm paksu kerros tiivistynyttä lunta. Myös tuuliolosuhteisiin tulee kiinnittää huomiota, sillä yli 5 m/s tuulessa ei suositella tehtävän kyseisiä mittauksia. Mittausalueella ei moottorikelkan kuljettajan ja mittaajan lisäksi saa olla muita henkilöitä alle 15 m etäisyydellä. Moottorikelkan ulkoiset melunlähteet eivät saa ylittää 10 dB ja käytettävän melumittarin tulee olla luokkaa 1 (Liikonen ym. 2007 SAE 2003 mukaan).



Kuva 2. Moottorikelkkamelun mittausjärjestely SAE J192 -standardin mukaan (Liikonen ym. 2007 SAE 2003 ja SAE 1983 mukaan).

SAE J1161 standardin mukaan ajomelun mittaaminen tapahtuu niin, että moottorikelkka kiihdytetään tavoitevauhtiin (n. 24 km/h) ennen lähtöviivaa. Moottorikelkka ei saa poiketa ajolinjan keskiviivasta yli 1 metriä. Mittauksia tehdään niin kauan, kunnes kolme lukemaa saadaan 2 dB sisään toisistaan. Mittaukset tehdään kelkan molemmilta puolilta ja lopulta kolmen mittauksen keskiarvo lasketaan yhden desibelin tarkkuudella kelkan meluisammalta puolelta (Liikonen ym. 2007 SAE 1983 mukaan).

Ajomelun lisäksi on mitattava myös moottorikelkan SAE J192 standardin mukainen maksimimelutaso, jonka mittaaminen on periaatteeltaan sama kuin ajomelussa. Moottorikelkka kiihdytetään n. 24 km/h nopeuteen, mutta ajomelun mittauksesta poiketen ennen lähtöviivaa kelkan kaasupainetaa täysin auki ja se pidetään auki aina maalilinjaan saakka. Lisäksi on selvitettävä moottorin maksimikiertoaika ohiajon aikana. Edellä mainittujen standardien virhemarginaaliksi on esitetty ± 2 dB (Liikonen ym. 2007 SAE 1983 ja 2003 mukaan).

5. Melumallinnuksessa käytettävät työkalut

5.1 Työkaluista yleisesti

Melumallinnukseen ja melun kartoittamiseen on monia työkaluja, joista suurin osa keskittyy kaupunkialueiden melun mallinnukseen (esim. Stoter ym. 2008; Sharma ym. 2010; Bocher ym. 2019). Melumallinnuksen taustalla Euroopassa on Euroopan unionin muodostaman direktiivin 2002/49/EY (2002) vaatimukset, joiden mukaan melua on kartoitettava alueilla, joissa melulle altistuu runsas määrä ihmisiä. Alueiden asukkailla on direktiivin mukaan oltava vapaa pääsy muodostettuihin malleihin ja aineistoon asuinalueensa melutilanteesta. Direktiivin tavoitteena on edistää asukkaiden terveydentilaa, johon melu olennaisesti vaikuttaa. Tässä osiossa kerrotaan ensin melumallinnuksen työkaluista yleisesti, käyttäen esimerkkinä kahta eri kaupunkiympäristön melumallinnukseen käytettävää työkalua, jonka jälkeen tarkastellaan perusteellisesti tässä työssä käytettäviä melumallinnustyökaluja.

Mallinnustyökalujen toimintaperiaatteet poikkeavat usein toisistaan olosuhteista ja käyttökohteesta riippuen. Kaupunkialueilla tehtävät melumallinnukset pyrkivät usein todenmukaiseen melun kolmiulotteiseen kuvaamiseen, sillä kaupunkiasutus on usein keskittynyt kerrostaloihin, mikä vaatii melun kuvaamista myös vertikaalisuunnassa (esim. Stoter ym. 2008; Farcas & Sivertun 2009; Zhao ym. 2017). Alueilla, missä asuinrakennusten korkeudet eivät ole suuria, on vielä mahdollista käyttää kaksiulotteista melun kuvaamista (Stoter ym. 2008: 907). Kaupungeissa korostuvat myös kovat pinnat, joista ääniaallot heijastuvat. Nämä kovat pinnat ja niiden sisällyttäminen malleihin on usein hyvin oleellisessa asemassa kaupunkialueiden melumallinnuksessa (Farcas 2008: 22-24; Bocher ym. 2019: 9). Äänisignaaliin vaikuttavista tekijöistä on olemassa matemaattiset perusteet sekä kaavat, jotka voidaan sisällyttää melumalleihin. Tässä opinnäytetyössä ei avata näitä perusteita tarkemmin. Mallinnuksen perusideana on varsinaisten empiiristen mittausten poisjättäminen, jotka itsessään voivat altistaa mallinnuksia virheille. Tämän takia käytettävien mallinnusmenetelmien kalibrointi on välttämätöntä tietyin aikavälein, sillä melutasot vaihtelevat ajassa ja mallinnuksissa käytettävät tiedot ovat yleensä pitkän aikavälin keskiarvoja, jotka ovat alttiita muutoksille (Farrelly & Brambilla 2003; Prezelj & Murovec 2017). Maastotöinä tehtävät mittaukset

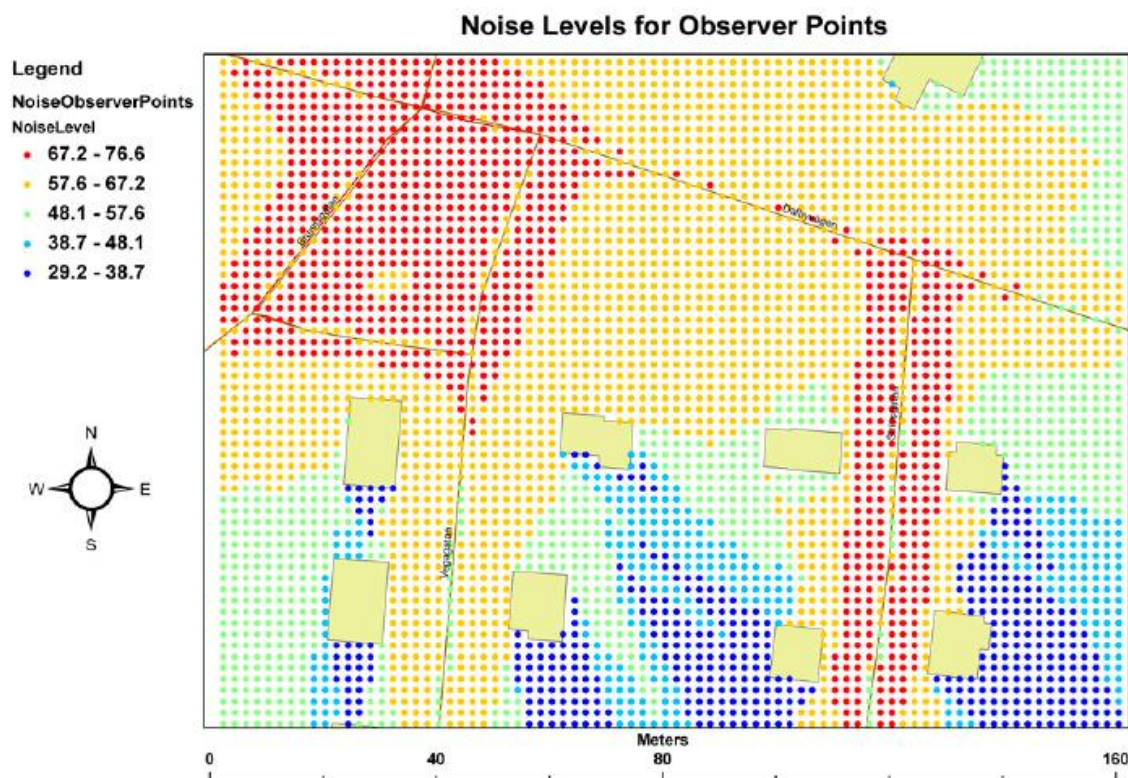
ovat yleensä hyvin kalliita ja vaativat ammattilaisen kerättyjen aineistojen käsittelyyn. Viime vuosina tähän ongelmaan on kehitetty ratkaisuna niin sanottuja Wireless Acoustic Sensor Networks (WASN) verkostoja, jotka mahdollistavat reaaliaikaisen mittaamisen ilman perinteisiä maastotöitä. WASN on otettu käyttöön jo monissa maissa, kuten Italiassa, Espanjassa, Kanadassa sekä Intiassa (Francesc ym. 2018: 72).

Kaupunkialueiden ja muiden tiheästi asuttujen alueiden melumallinnukseen kehitetyissä työkaluissa ei yleensä ole myöskään monia toimintoja, jotka ovat luontokohteissa oleellisessa asemassa. Ne jättävät usein huomiotta esimerkiksi kasvien vaikutuksen äänen kulkuun sekä maanpinnan korkeuden vaihtelun (Barber ym. 2011: 1292). Kaupunkialueilla usein tasainen maasto mahdollistaa tämän toiminallisuuden pois jättämisen (esim. Sharma ym. 2010; Suárez & Barros 2014). Harvaan asutuilla alueilla ja luontokohteissa on tärkeää huomioida myös melun vaikutus eläimiin ihmisten lisäksi. Tämän lisäyksen mukana tulee tarve ottaa malleissa huomioon myös eri lajien kuulominaisuudet. Lajien välillä on suuria eroja esimerkiksi siinä, miten mikäkin laji reagoi mihinkin äänen taajuusalueeseen (Lohr ym. 2003).

Perinteiset kaupunkimelun mallinnustyökalut ja niiden toimintaperiaatteet ovat hyvin samankaltaisia. Käytännössä mallit vaativat toimiakseen jonkinlaisen melunlähteen, joka työkalusta riippuen on yleisesti joko pistemäinen tai viivamainen kohde. Melunlähteen lisäksi mallit vaativat jonkinlaiset vastaanottopisteet, joiden muodostaminen on usein toteutettu hieman toisistaan eriävin tavoin. Kaupunkialueilla lähtöaineistona on usein vektorimuotoisina tasoina rakennukset sekä tieverkosto. Oleellista on myös tieto alueen liikennemääristä sekä jonkinlainen käsitys melun keskimääräisestä suuruudesta (Stoter ym. 2008; Farcas & Sivertun 2009).

Farcas & Sivertun (2009) esittävät julkaisussaan askel askeleelta työkalun kehittämisen vaihteita yksinkertaisista mallinnuksista yhä monimutkaisempiin. Työkalu on ArcMap-pohjainen ja se on ohjelmoitu Visual Basicin avulla. Julkaisusta selviää hyvin kaupunkialueen melumallinnuksen perusperiaatteet ja toiminnot mallinnuksen takana. Malli ottaa huomioon monia eri kaupunkialueelle tyypillisiä ja oleellisia muuttujia, kuten liikennemäärän, kulkuneuvojen nopeudet sekä esteet ääniaallon tiellä. Malli toimii yksinkertaistetusti niin, että se muodostaa vastaanottopisteet halutulla etäisyydellä

toisistaan, valitsee vuorotellen eri tieosuudet, muodostaa näkymää kuvaavan kolmion vastaanottopisteen ja tieosuuden välille ja havaitsee mahdolliset esteet näkymässä. Näitä tietoja hyväksi käyttäen malli laskee tarvittavat vähennykset äänisignaalille ja antaa vastaanottopisteelle lopullisen arvon. Kun kaikki tieosuudet on yhden pisteen osalta käyty läpi, siirrytään seuraavaan vastaanottopisteeseen. Lopputulos on kuvan 3 mukainen.



Kuva 3. Vastaanottopisteet väritettynä melutason (dB) mukaan (Farcas & Sivertun 2009: 5).

Toinen vastaavanlainen työkalu, joka on monista melumallinnustyökaluista poiketen avoimen lähdekoodin alainen, on nimeltään NoiseModelling (Bocher ym. 2019). Tässä työkalussa toiminta perustuu sädemäiseen signaaliin, joka esteen kohdatessaan heijastuu. Äänisignaaliin tehtävät korjaukset ja vähennykset ovat samankaltaisia, kuin Farcasin & Sivertunin työkalussa, mutta ottaen huomioon julkaisun ajankohdan, on siinä otettu huomioon etenkin laskennan tehokkuus. Farcasin ja Sivertunin (2009) työkalusta poiketen NoiseModelling -työkalussa äänen lähteet ovat pistemäisiä. Niiden jaottelu tieverkoston päälle on riippuvainen lähellä olevista vastaanottopisteistä. Tällä tavoin on

mahdollista keventää laskentaa entisestään. Tämä työkalu on kehitetty OrbisGIS-ohjelmistossa käytettäväksi, se on ohjelmoitu Java-ohjelmointikielellä ja se käyttää hyväkseen H2-tietokantaa. Muita yleisiä kaupallisia melumallinnustyökaluja ovat esimerkiksi CadnaA (Computer Aided Noise Abatement), SoundPLAN, Predictor-LimA sekä NoiseMap.

5.2 SPreAD-GIS

SPreAD-GIS:n toiminta perustuu Yhdysvaltojen maatalousministeriön metsäosaston kehittämään malliin, jota on käytetty arvioimaan melun vaikutusta ulkoilualueiden virkistyskäyttäjien. Malli on alun perin ollut manuaalinen, taulukkopohjainen, askel askeleelta tapahtuva melukartoitus, jossa kaikki askeleet ja työvaiheet ovat tarkasti esitelty ja ohjeistettu (Harrison ym. 1980). Mallissa on käytetty hyväksi toista mallia nimeltään Acoustic Detection Range Prediction Model (ADRPM), joka on muodostettu moottoriajoneuvojen akustisen havaittavuuden tarkasteluun. Työkalu ottaa laskennassaan huomioon monia ääneen vaikuttavia vaimentavia tekijöitä kuten leviämismaimennuksen, ilmakehän absorption, maanpeitteen ja kasvillisuuden, myötä- ja vastatuulen sekä maanpinnan korkeuden vaihtelun (Keyel ym. 2017).

SPreAD-GIS on muodostettu automatisoimaan aikaisemmin manuaaliset työvaiheet. Työkalun toiminnassa on pyritty ottamaan huomioon käytettävän aineiston mahdollisimman helppo ja laaja saatavuus. Työkalu vaatii syötteenä:

1. melunlähteiden sijainnin ja jokaiselle melunlähteelle oman tunnistensa,
2. alueen, jolla malli halutaan suorittaa. Yleisesti se on polygonitaso ja mitä suurempi tämä alue on, sitä pidempi laskenta-aika,
3. melunlähteen ominaisuudet eli malli ottaa vastaan 1/3 oktaavin taajuusalueen, jolle malli halutaan suorittaa. SPreAD-GIS pystyy mallintamaan melun etenemistä 13 taajuusalueella välillä 125 Hz – 2000 Hz. Tiedossa on oltava myös mittausetäisyys. Tiedot syötetään csv -muotoisena taulukkona, jossa ovat sarakkeet Frequency, dB sekä Measurement_Distance,

4. korkeusmallin, jonka arvot ovat metreinä. Korkeusmallin tulisi olla laajuudeltaan vähintään sama, kuin aikaisemmin mainittu mallinnusalueen määrittävän polygonin laajuus. Oleellista on myös, että kaikki mallinnuksessa käytettävät rasteritasot olisivat pikselikooltaan samoja,

5. maanpeiteaineiston, joka on uudelleenluokiteltava malliin sopivaksi omaan sarakkeeseensa nimeltään SPREADTYPE (taulukko 4),

6. sääolosuhteet, joihin kuuluvat ilman lämpötila (°C), suhteellinen kosteus (%), tuulennopeus (km/h), vallitseva tuulen suunta (°) sekä yleinen kuvaus olosuhteista mittausajankohdasta riippuen,

7. valinnaisena on mahdollista syöttää myös tieto taustamelun määrästä.

Maanpeiteluokittelu on suunniteltu alun perin käytettäväksi Yhdysvaltojen tuottamilla maanpeiteaineistoilla (*National Landcover Database*, NLCD), joten kaikkia samoja luokkia ei välttämättä mallinnusalueesta riippuen ole saatavilla (Keyel & Reed 2017).

Taulukko 4. SPreAD-GIS maanpeitteen luokittelu (Keyel & Reed 2017).

Land cover type	SPREADTYPE	NLCD Codes ¹
Barren land	BAR	31
Coniferous forest	CON	42, 43
Herbaceous or grassland	HEB	71 – 74, 81, 82
Hardwood or deciduous forest	HWD	41
Shrubland	SHB	51, 52
Urban or developed land	URB	21 – 24
Water	WAT	11, ≥90

Mallin suorittamiseen kuluva aika on pitkälti riippuvainen melulähteinä toimivien pisteiden määrästä, mallinnettavien taajuuksien kirjosta sekä aineiston resoluutiosta. Työkalun aikaisemmissa versioissa melun lähteenä on ollut mahdollista käyttää myös viivamaista aineistoa, mutta aiheutuneiden häiriöiden takia on mallissa siirrytty vain pistemäisiin melunlähteisiin. Mallinnuksen eri vaiheet voidaan myös tallentaa erikseen, jolloin on mahdollista tarkastella esimerkiksi yksittäisen vaimentavan tekijän vaikutusta

äänen kulkuun. Myös yksittäisten taajuusalueiden tarkastelu on mahdollista. Lopputuloksena työkalu antaa rasteritason, jossa on huomioitu kaikki tarvittavat vähennykset sekä haluttu taajuuspainotus (Keyel & Reed 2017).

5.3 NMSIMGIS

NMSIMGIS:n toimintaperiaatteet poikkeavat SPreAD-GIS:stä. Työkalu on muodostettu käyttäen hyväksi NMSim -työkalun algoritmeja, joka on Yhdysvaltojen kansallispuistoja hallinnoiman osaston käyttöön tarkoitettu melumallinnusohjelmisto pääasiassa lentokoneiden ja lentokenttien melun mallintamiseen. NMSIMGIS ei SPreAD-GIS:stä poiketen ota huomioon kasvillisuutta äänen kulun esteenä, vaan sen laskemat vähennykset äänen kulussa perustuvat maanpinnan kovuuteen sekä pinnanmuotoihin. Työkalu ottaa sääolojen kohdalla huomioon vain ilman lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden. Työkalun muita ääniaaltoon kohdistuvia vähennyksiä ovat leviämisvaimennus sekä ilmakehän absorptio. Työkalun melunlähteinä toimiville pisteille on mahdollista attribuuttitaulukon avulla antaa etenkin lentokoneiden melun mallintamisessa käytettäviä ominaisuuksia, kuten nopeus (m/s) (SPEED), kulkusuunta (°) (HEAD), sivuttaiskallistuma (°) (ROLL), pitkittäiskallistuma (°) (PITCH), moottoriteho (%) (ENGINE) sekä etäisyys maanpinnasta (m) (S_OFFSET) (Keyel & Reed 2017). Lisäksi SPreAD-GIS:n tapaan malli vaatii toimiakseen myös korkeusmallin.

NMSIMGIS vaatii toimiakseen omanlaisensa taulukon mallinnuskohteen äänispektristä, joka on mahdollista muodostaa työkalupakin mukana tulevalla erillisellä työkalulla SPreAD-GIS:ssä käytettävästä taajuusspektritaulukosta. SPreAD-GIS:stä poiketen työkalu vaatii syötteenä myös vastaanottajan korkeuden maanpinnasta metreinä. Maanpeitteen osalta on muodostettava uudelleenluokittelun avulla rasteritaso, jossa on taulukon 5 mukaiset luokat omassa sarakkeessa nimeltään NMSIMTYPE (Keyel & Reed 2017).

Taulukko 5. NMSIMGIS maanpeitteen luokittelu (Keyel & Reed 2017).

Land cover type	NMSIMTYPE	NLCD codes ¹
Open water	WATER	11
Snow-covered landscape	SNOW	12
Developed, open space	URBAN1	21
Developed, low intensity	URBAN2	22
Developed, medium intensity	URBAN3	23
Developed, high intensity	URBAN4	24
Barren land	BARREN	31
Unconsolidated shoreline	SHORE	32
Deciduous, evergreen, or mixed forest	FOREST	41 – 43
Dwarf scrub or shrub/scrub	SHRUB	51, 52
Grassland/herbaceous landcover	GRASS	71, 72, 81, 82, 95
Wetlands of any type	WETLAND	≥90
Lichen-dominated landscape (Alaska)	LICHEN	73
Moss-dominated landscape (Alaska)	MOSS	74
NoData classification used in Alaska	AK	1

6. Aikaisemmat tutkimukset

SPreAD-GIS on ollut käytössä useissa tutkimuksissa, joissa on mallinnettu ja arvioitu pääasiassa melun vaikutusta eläimiin (Proto ym. 2016; Keyel ym. 2018; Ghadirian ym. 2019). Melun lähde vaihtelee mallinnuksesta toiseen. Esimerkiksi Ghadirian ym. (2019) käsittelevät tutkimuksessaan tiemelun vaikutusta eläimiin, eli melun lähde on dynaaminen. Mathews ym. (2017) taas ovat tutkineet tornadosireenien tuottaman melun leviämistä ja laajuutta. Erilaisia skenaarioita on siis monia, mikä osoittaa myös SPreAD-GIS:n soveltuvuuden moniin eri tilanteisiin.

Keyel ym. (2018) tutkivat erilaisten melulähteiden ominaisuuksia ja vaikutuksia luonnonolosuhteissa. He tutkivat kaasunporauksen, mönkijöiden sekä moottorikelkkajen melua ja niiden vaikutusta muulipeuroihin sekä amerikkannakkeleihin. He huomasivat, että hyvin pienetkin muutokset melulähteiden sijainnissa vaikuttavat melun määrään kriittisillä alueilla. Eli oleellista on käyttää hyväksi esimerkiksi

maastonmuotoja, jotka toimivat esteenä melulle.

Proto ym. (2016) käsittelivät tutkimuksessaan puiden kaatamiseen liittyvää melua. He huomasivat, että etenkin käytettävillä välineillä on suuri vaikutus melun määrään. Esimerkiksi useampi puuston poistovientiin tarkoitettu ajoneuvo ei tuota yhtä paljon melua, kuin moottorisaha yksinään.

Ghadirianin ym. (2019) tutkimuksessa Iranin läpi kulkevan tien vaikutuksesta eläimien habitaattiin käy ilmi, että melun vaikutus ilmenee vielä kilometrien päässä itse tiealueesta. Tällä voi olla vaikutusta eläinten käyttäytymiseen monella eri saralla. He tuovat esille, että mallinnus on erittäin hyvä työkalu arvioitaessa eläinten suojeluun käytettäviä toimenpiteitä.

Akay & Akar (2019) tutkivat metsän raivauksessa syntyvät melun vaikutusta lintuihin ja ihmisiin. He toteavat artikkelissaan, että melumallinnuksen tuloksia voidaan käyttää melun vaikutusten arvioimiseen ja jatkotoimien määrittämiseen liiallisen altistumisen välttämiseksi. Heidän mukaansa oleellista on, että melun osalta työntekijöitä perehdytetään ja työstä pidetään riittävästi taukoja. Suojautuminen melulta erilaisin suojavarustein on myös tärkeää, kuten myös työkalujen säännöllinen huolto. Edellä mainituilla toimenpiteillä voidaan ehkäistä myös negatiivisia vaikutuksia eläimiin.

Kaikissa edellä mainituissa tutkimuksissa puutteena on vertailtavan aineiston puute. Eli mallinnuksia varmistavia mittauksia ei ole suoritettu. Varsinaista mallinnuksen tarkkuutta on hyvin vaikea näiden tutkimusten perusteella siis arvioida.

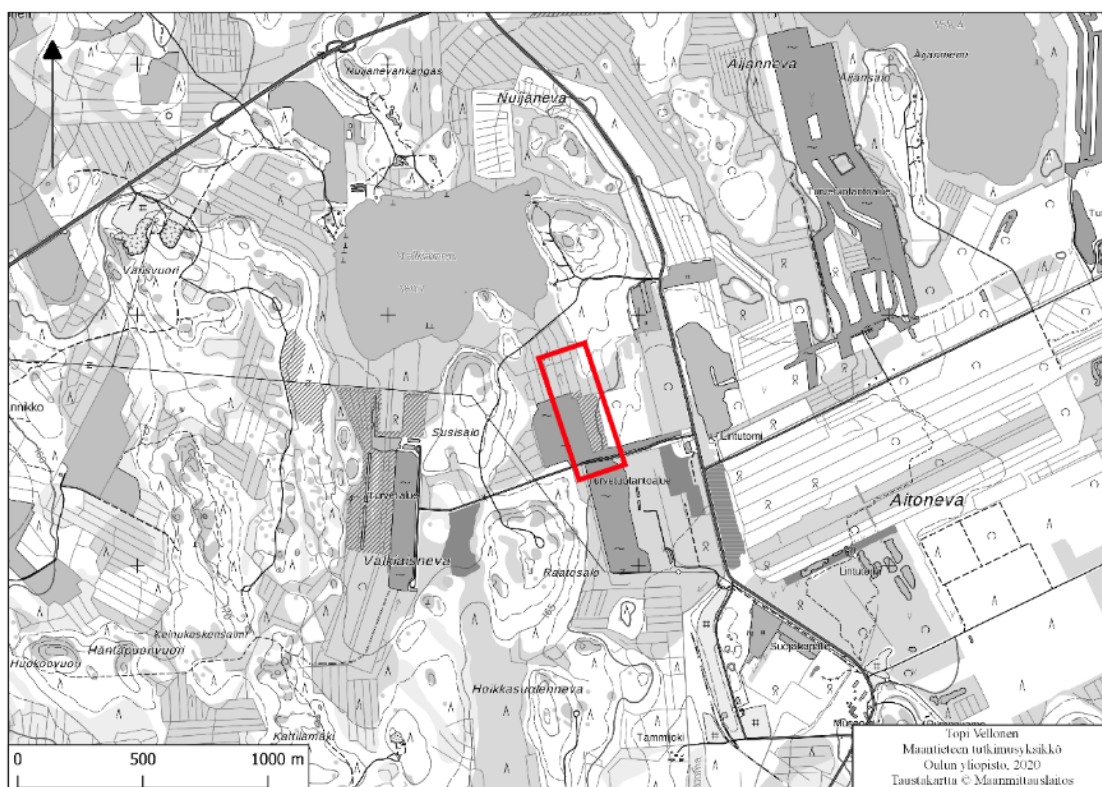
7. Tutkimusalueet

Tutkimusalueiksi valikoituivat mallinnusten tulosten ja empiiristen aineistojen vertailtavuuden vuoksi samat kaksi aluetta, joita käytettiin empiiristen mittausten tekemisessä. Kyseessä on Liikosen ym. (2007) mittauksissa käytetyt kaksi mittaustaikaa, joista toinen sijoittuu metsäiseen maastoon ja toinen järven jäälle. Mittauspaikat sijaitsevat Kihniön kunnassa, Pirkanmaan maakunnan luoteisrajalla. Tutkimusalueet on varsinaisia mallinnuksia varten georeferoitu vastaamaan oikeaa

mittauspaikkaa.

7.1 Valkiaisnevan alue

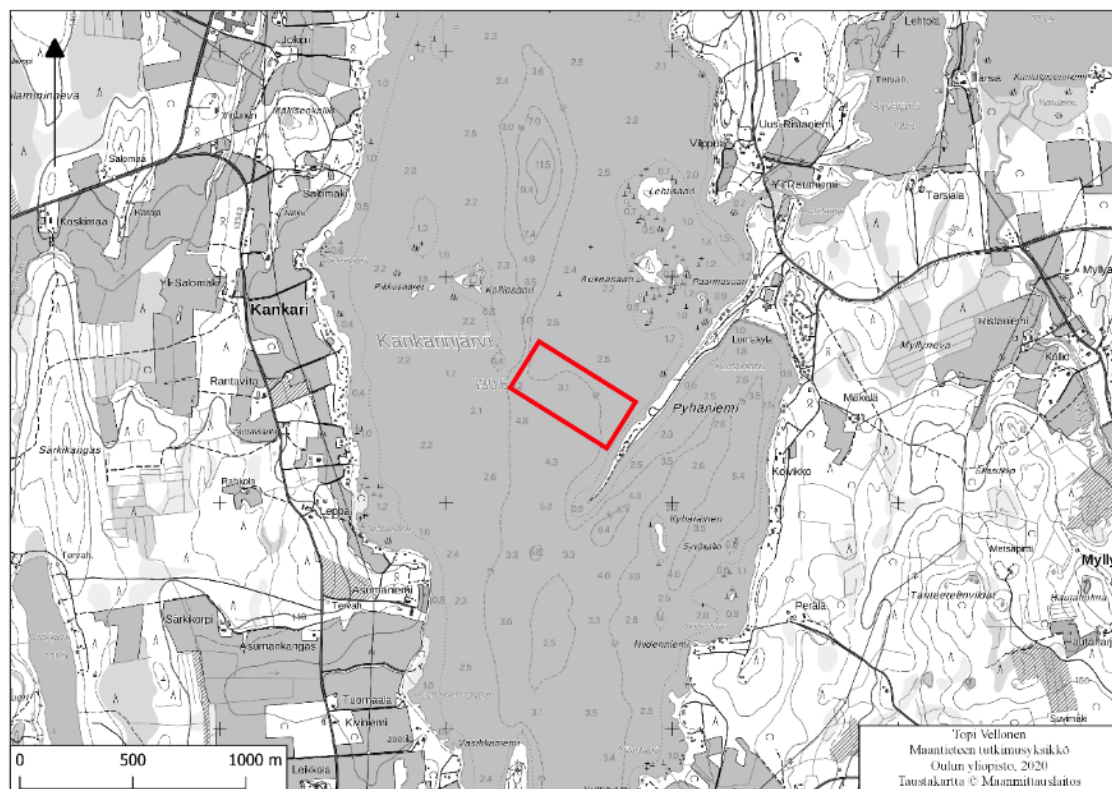
Valkiaisnevan alue on valittu Liikosen ym. (2007) tekemiin mittauksiin etenkin sen perusteella, että muita mittauksia häiritseviä melunlähteistä ei olisi lähistöllä. Valinnassa on myös otettu huomioon käytettävien standardien antamat suositukset. Alue on mittausten aikaan ollut pääasiassa nuorta havumetsää lukuun ottamatta läheisiä turvetuontantoalueita sekä vesistöjä. Mittausalue on merkitty kuvaan 4 punaisella suorakulmiolla.



Kuva 4. Valkiaisnevan mittausalue (Liikonen ym. 2007).

7.2 Kankarinjärven alue

Kankarinjärven mittausalue sijoittuu Valkiaisnevasta länteen. Mittauspaikka on merkitty kuvaan 5 punaisella suorakulmiolla.



Kuva 5. Kankarinjärven mittausalue (Liikonen ym. 2007).

8. Aineisto ja menetelmät

SPreAD-GIS:n sekä NMSIMGIS:n aineistovaatimukset on lueteltu osiossa *Melumallinnuksessa käytettävät työkalut*. Seuraavaksi eritellään tutkielmassa käytettävät eri aineistot ja niiden alkuperä.

8.1 Digitaalinen korkeusmalli

Digitaalinen korkeusmalli eli DEM (*digital elevation model*) tarvitaan mallinnuksessa korkeuserojen vaikutusten arviointiin. Korkeusmalli ladattiin Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen tiedostopalvelusta. Malli on tehty Maanmittauslaitoksen laserkeilausaineiston pohjalta ja sitä on saatavilla rasterina sekä 2 m, että 10 m resoluutiossa. Tutkielmassa käytettiin 10 m resoluution korkeusmallia, jonka resoluutio muutettiin 25 metriin. Resoluutiomuutoksen taustalla oli maanpeiteaineiston karkea resoluutio. Malleissa suositellaan käyttämään samaa resoluutiota olevia rasteriaineistoja. Käytettävien mallien ohjeistuksessa suositellaan käyttämään 30 m resoluution korkeusmallia, mutta melulähteiden määrä oli tutkielmassa niin vähäinen, että sen koettiin kompensoivan laskentaan kuluvaan aikaa.

8.2 Melunlähteet

Melunlähteiden on oltava mallissa pistemäisessä muodossa. Tutkimusalueiden mukaan määritetyt mittausten keskikohdat digitoitiin ja pisteille annettiin ominaisuustietona ID-numero. ID:tä käytetään mallissa eri pisteiden tunnistamiseen. Tämä tuli ottaa huomioon etenkin safariajoa kuvaavissa mallinuksissa, joissa melun lähteitä oli useampia, eli tässä tapauksessa neljä kappaletta.

8.3 Melunlähteiden ominaisuudet

Malli vaatii tiedon mallinnettavista taajuusalueista, äänen tasosta sekä mittausetäisyydestä. Tietoa moottorikelkkojen eri taajuusalueiden tuottamasta

äänenvoimakkuudesta on saatavilla hyvin vähän, joten tässä tutkielmassa käytettiin työkalun mukana saapuvia tietoja, jotka on muodostettu Harrisonin ym. (1980) mukaan. Liikosen ym. (2007) tekemien mittausten perusteella oli mahdollista valita työkalun mukana tulevasta äänispektritaulukosta mittauksia vastaavat äänenpainetasot. Tässä tutkielmassa arvojen interpolointi oli joissain tapauksissa välttämätöntä valmiiksi annettujen taajuusspektrien riittämättömyyden vuoksi. Käytetyt arvot ovat lueteltuna taulukossa 6. Safariajojen mallinnuksessa käytettiin 40 km/h arvoja kullekin pisteelle.

Taulukko 6. Mallinnuksissa käytetyt äänenpainetasot taajuuksittain.

Taajuus (Hz)	40 km/h (dB)	60 km/h (dB)	Kiihdytys (dB)
400	48	52	64
500	57	61	73
630	53	57	65
800	49	53	62
1000	51	55	63
1250	58	62	74
1600	58	62	74
2000	58	62	74

8.4 Mallinnusalue

Mallinnusalueen rajaaminen tapahtui polygonitason avulla. Polygoni on piirrettävä haluttuun muotoon ArcMapin editointityökalujen avulla. Oleellista on, että muodostettu mallinnusalue on pienempi, kuin käytettävän maanpeiteaineiston sekä korkeusmallin laajuudet.

8.5 Maanpeite

Mallinnuksessa käytettiin hyväksi Suomen Ympäristökeskuksen muodostamaa Corine-maanpeiteaineistoa (SYKE 2006). Aineisto vaati uudelleenluokittelun, jotta sitä oli mahdollista käyttää SPreAD-GIS:ssä sekä NMSIMGIS:ssä. Huomioitavaa on, että maanpeiteaineistona käytettiin Corine-maanpeiteaineistoa vuodelta 2006, jotta mallinnusasetelma vastasi mahdollisimman hyvin mittaustilanteen olosuhteita. Aineisto

oli pikselikooltaan 25 metriä. Uudelleenluokittelu muodostettiin työkalun mukana tulevan ohjeistuksen mukaisesti. Osa luokittelusta tehtiin myös oman harkinnan mukaan, koska täysin alkuperäistä vastaavia luokkia ei ollut saatavilla. Esimerkiksi SPreAD-GIS:n osalta jääalueet oli luokiteltava luokkaan HEB (*herbaceous or grassland*), koska lumi ei ollut omana luokkanaan mallin luokkajaottelussa. Luokittelun periaatteet ovat nähtävillä taulukoista 4 ja 5.

8.6 Sääolosuhteet

Sääolosuhteet ovat peräisin Liikosen ym. (2007) teettämien moottorikelkkamelun mittauksen raportista sekä Ilmatieteen laitoksen raportista Suomen ilmaston tilastoista välillä 1981-2010. Tässä tutkielmassa käytettiin keskiarvoja mittauspäivän sääolosuhteiden arvoista lukuun ottamatta suhteellista ilmankosteutta, joka oli maaliskuun keskiarvo mittausvälillä 1981-2010 Tampere-Pirkkalan lentoaseman säähavaintoasemalla (Pirinen ym. 2012). Sääolosuhteet pitivät sisällään kokonaisuudessaan tuulennopeuden, lämpötilan, ilmankosteuden sekä tuulen suunnan. Arvojen tarkoituksena on tarkentaa etenkin mallinnusalueen tuulen käyttäytymistä ja muotoa sekä ilman absorptiota. Yksittäisten arvojen lisäksi oli vielä syötettävä tieto yleisestä säätilasta esimerkiksi muodossa ”clear, calm summer day” tai ”clear, calm winter day”. Mallinuksissa käytettiin olosuhteista riippuen yleisenä säätilana ”clear, windy winter day” tai ”clear, calm winter day”. Käytettävät arvot poikkesivat toisistaan mittauspaikan mukaan. Arvot olivat taulukon 7 mukaiset.

Taulukko 7. Mallinuksissa käytetyt sääolosuhteiden parametrit (Liikonen ym. 2007).

Mittauspaikka	Tuuli (km/h)	Tuulen suunta (°)	Suhteellinen ilmankosteus (%)	Lämpötila (°C)	Yleinen säätila
Valkiaisneva	10	330	82	-7.4	Clear, windy winter day
Kankarinjärvi	2.9	80	82	-3.9	Clear, calm winter day

8.7 Ympäristöministeriön mittausaineisto

Mallinnuksia verrattiin Ympäristöministeriön tilaamiin vuonna 2007 tehtyihin mittauksiin (Liikonen ym. 2007). Mittausten pohjalta tehty raportti sisälsi tiedon moottorikelkkojen enimmäisäänitasosta ohiajossa eri nopeuksilla, joita oli mahdollista käyttää SMT:n mukana tulleiden äänispektri-arvojen interpolointiin. Mittauksia tehtiin myös safariajotilanteissa neljän ja kahdeksan moottorikelkan ryhmissä. Safariajoista käytettiin mallinnuksissa vain neljän moottorikelkan ryhmien tuottamia mittaustuloksia. Tuloksista käytettiin tässä tutkielmassa keskiarvoja, sillä lopullisessa käyttötarkoituksessa hyvin todennäköisesti ei ole mahdollista eritellä melunlähteitä moottorikelkkojen mallien mukaan. Mittaukset on tehty asianmukaisten standardien esittämillä menetelmillä.

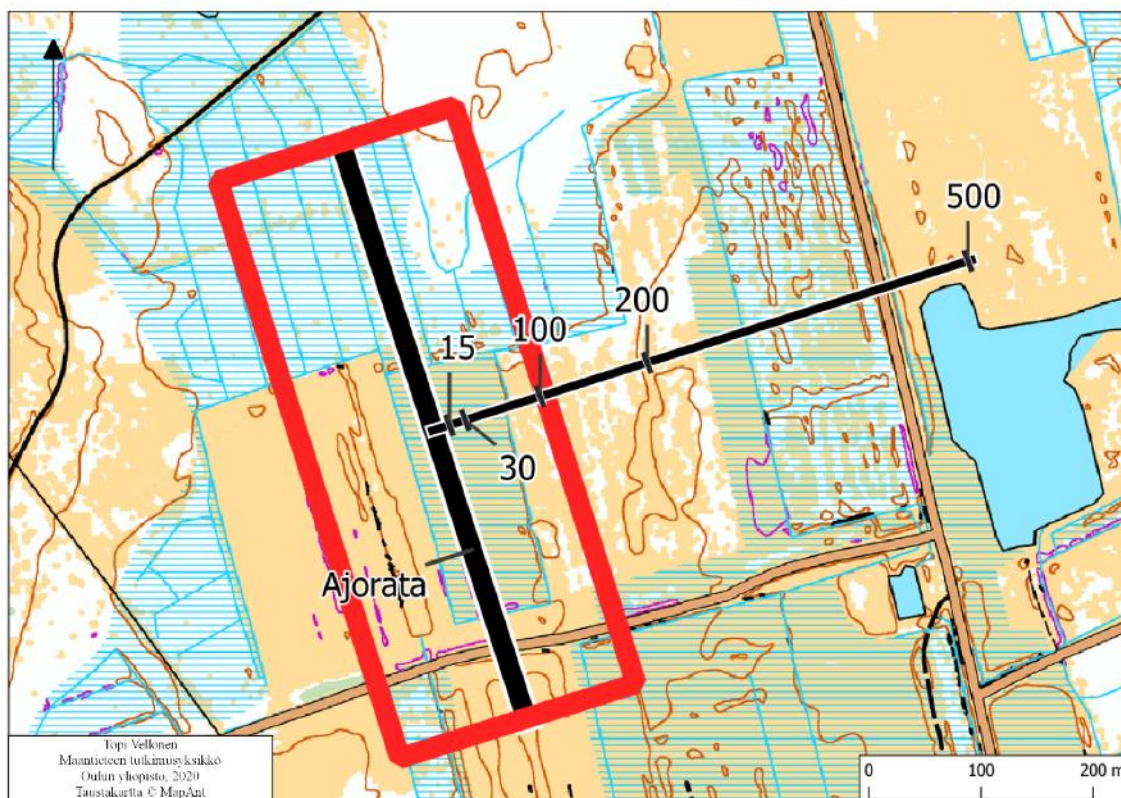
8.8 Mallinnusasetelma

Mallinnuksia varten oli muodostettava toistettava asetelma, jonka avulla olisi mahdollista verrata mallinnusten tuloksia Ympäristöministeriön teettämien melumittausten tuloksiin. Ministeriön teettämistä mittauksista oli saatavilla tieto melun leviämisestä ja vaimentumisesta eri etäisyyksillä, sekä yksittäisten kelkkojen osalta, että safariajossa. Safariajojen osalta tulokset olivat yksittäisiä kelkkoja suppeammin kuvattu. Mittausetäisyydet sekä etäisyyttä vastaava desibelimäärä yksittäisten kelkkojen osalta on kuvattu taulukossa 8. Kyseessä olivat alun perin kiihdytyksessä aiheutuneet enimmäisäänitasot kolmelta eri päivältä. Itse mallinnuksissa käytettiin vain mittauspäivän 15.3 sekä 17.3 keskiarvoja eri etäisyyksillä, jotta mallinnusten määrä ei olisi kohtuuttoman suuri. 15.3 tehdyt mittaukset ovat metsässä tehtyjä mittauksia ja 17.3 jäällä tehtyjä. Kyseisiä arvoja käytettiin mallien käyttökelpoisuuden todentamiseen, sillä eri etäisyyksillä tapahtuneet mittaukset oli toteutettu vain kiihdytysten sekä safariajojen osalta eli vastaavaa tietoa ei ollut saatavilla esimerkiksi yksittäisten kelkkojen eri nopeuksilla tapahtuvasta ajosta.

Taulukko 8. Mittauspäivät sekä mittausetäisyyksiä vastaavat äänenpainetasot (db(A)) (Liikonen ym. 2007).

	Mittausetäisyys (m)				
Mittauspäivä	15.2	30	100	200	500
15.3	80.48	71.78	55.78	45.75	
15.3 (Safari)	78	74	58	46	41
17.3	81.53	74.2	61.87	56.07	

Käytännössä mallinnukset ArcMapissa tapahtuivat niin, että mallinnuspaikat georeferoitiin vastaamaan todellista sijaintia, jonka jälkeen oli mahdollista digitoida mittausalue, sekä ajorata kartalle. Lisäksi ajoradasta merkittiin keskipiste, josta muodostettiin suorassa kulmassa vielä 15.2, 30, 100 sekä 200 metrin etäisyyksillä mittauspisteet (Kuva 6). Safariajojen mallinnusten kohdalla mittauspisteisiin lisättiin vielä yksi piste 500 metrin etäisyydelle. Safariajoa mallinnettiin vain Valkiaisnevan alueelta. Mittauspisteille annettiin vielä attribuuttitietona suunta suhteessa ajorataan (Itä/Länsi) sekä tunnisteena etäisyys ajoradasta. Huomioitavaa on se, että Liikosen ym. (2007) tekemien mittausten lopullisissa tuloksissa on käytetty vain moottorikelkan meluisamman puolen arvoja. Tarkkaa tietoa käytettävästä puolesta ei ole saatavilla, joten tutkielman lopullisissa vertailuissa on käytetty mallinnusten tulosten perusteella meluisamman puolen arvoja. Melunlähteenä käytettiin muodostettua keskipistettä ajoradalla, lukuun ottamatta safariajoa, jonka kohdalla ajoradan keskikohdalle muodostettiin neljän pisteen ryhmä 20 m turvaetäisyydelle toisistaan. Tarkkaa tietoa etäisyydestä ei ole, mutta Liikosen ym. (2007) mukaan kyseessä on normaali, turvallinen safariajoetäisyys, joka on noin 20-30 metriä.



Kuva 6. Muodostettu mittausasetelma Valkiaisnevalla. Asetelma oli täysin vastaava myös Kankarinjärvellä.

Seuraavaksi muokattiin työkalupakin mukana tuleva Python-skripti, joka mahdollisti mallinnusten toteuttamisen sarjoina, jolloin kummaltakin tutkimusalueelta oli mahdollista suorittaa kaikki mallinnukset kummallakin mallityypillä yhdellä kertaa. Mallinnuksia tehtiin lopulta yhteensä 14 kappaletta eli kummallakin mallinnusmenetelmällä mallinnettiin moottorikelkkojen melutasoja kiihdytyksessä, 40 km/h, 60 km/h sekä pelkästään Valkiaisnevalla safariajossa 40 km/h.

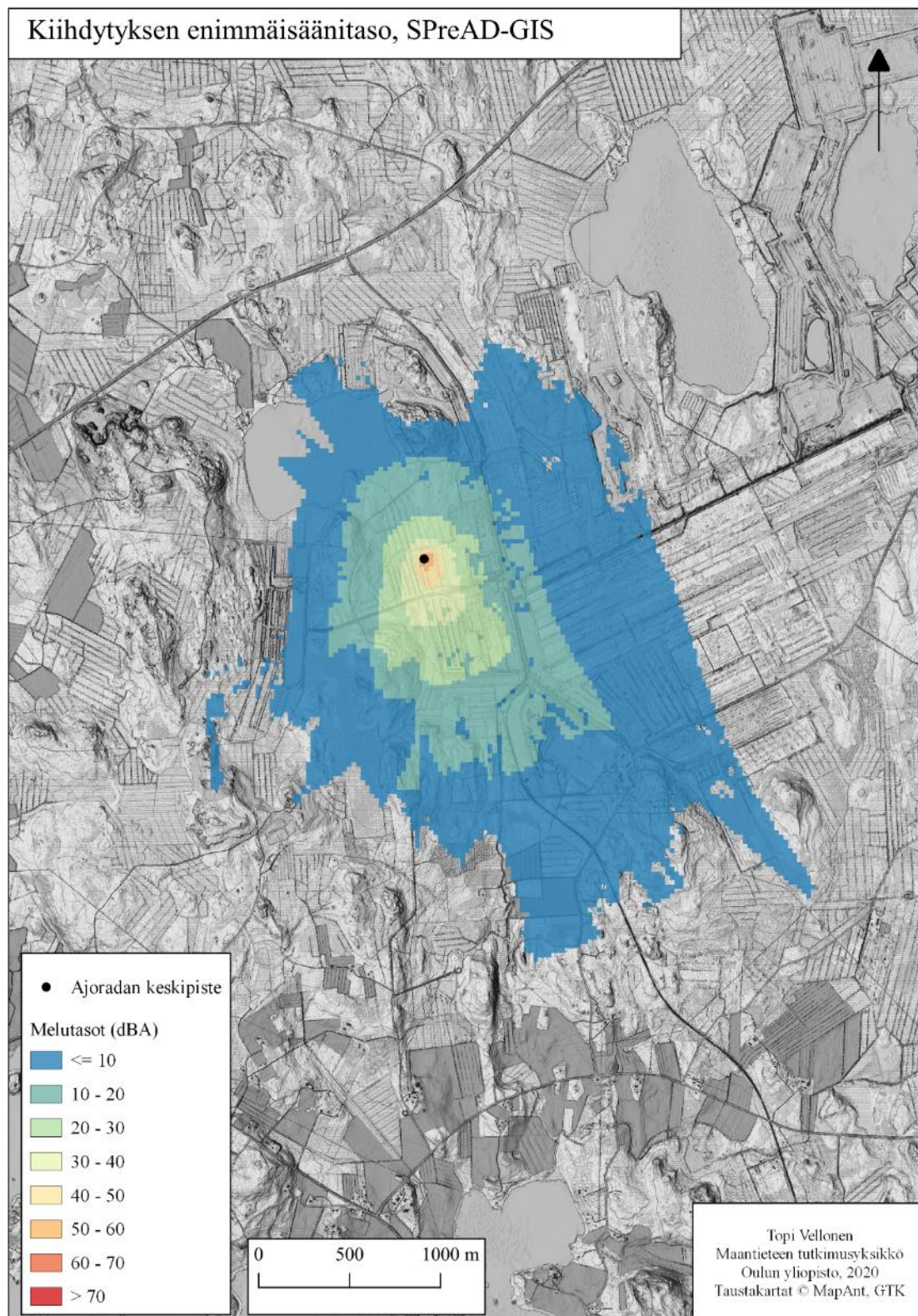
Mallinnusten valmistuttua muodostettiin Python-skripti, jolla käytiin läpi mallinnustulokset. Skriptin toiminta perustui ArcMapin Extract Values to Points-työkaluun, jonka avulla on mahdollista tallentaa rasteritason arvo annettujen mittauspisteiden kohdalta uuteen pistetasoon. Rasterista irrotetun arvon lisäksi attribuuttina on mittauspisteisiin ominaisuustietona lisätty etäisyys ajoradasta, jolloin irrotettujen arvojen erottelu mittausarvojen vertailua varten olisi helpompaa. Lisäksi skriptiin lisättiin listana taulukossa 8 esitetyt keskiarvot kunkin mittauspäivän tuloksista,

joihin mallinnustuloksista irrotettuja rasteriarvoja vertailtiin. Skripti antoi tuloksena tekstitiedoston, jossa oli eriteltynä mallinnustuloksen poikkeama kunkin mittauspisteen kohdalla Liikosen ym. (2007) tekemiin mittauksiin verrattuna ja lisäksi poikkeaman aritmeettinen keskiarvo. Yksittäisten suurten arvopoikkeamien aiheuttamien vääristymien välttämiseksi Extract Values to Points -työkaluun oli mahdollista syöttää parametrina rasteriarvojen interpolointi. Tässä opinnäytetyössä interpolointi oli käytössä. Mallinnusten tavoiteltava virhemarginaali oli ± 5 dB(A).

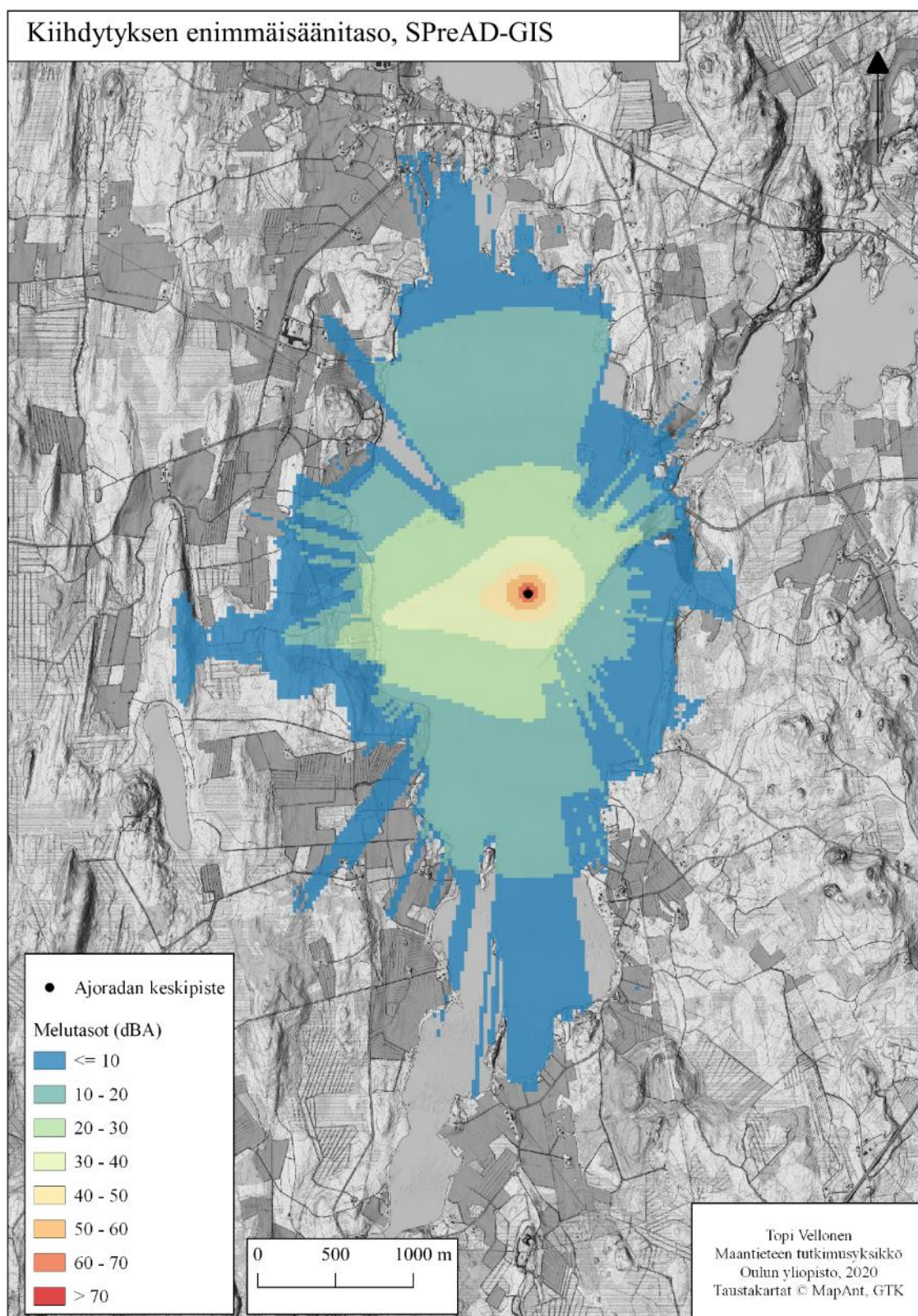
9. Tulokset

Tässä osiossa tarkastellaan mallinnusten tuloksia ja verrataan niitä kiihdytysten sekä safariajon osalta Liikosen ym. (2007) tuloksiin eri etäisyyksillä ajoradasta. Mallinnustulokset, joita ei voida mittauksien avulla varsinaisesti todentaa, ovat sisällytettynä tutkielmaan siksi, että esimerkiksi 40 km/h sekä 60 km/h ovat yleisimpiä nopeuksia, joita moottorikelkoilla ajetaan. Kyseiset tulokset on esitetty tässä opinnäytetyössä liitteinä (Liitteet 1-8). Tulokset käydään tekstissä läpi mallinnusten osalta, joita voidaan verrata suoraan mittaustuloksiin eri etäisyyksillä. Mallinnukset tehtiin Esri:n ArcMapin versiolla 10.4.1. Tulokset on esitetty karttojen sekä taulukoiden avulla. Tulostulosten muodostamiseen ja visualisointiin käytettiin QGIS 3.10.2-ohjelmistoa, jonka visualisointityökalut ovat opinnäytetyön tekijän tottumuksesta huomattavasti kattavampia ArcMap:iin verrattuna.

9.1 Kiihdytyksen enimmäisäänitaso



Kuva 7. Kiihdytyksen enimmäisäänitason SPreAD-GIS-mallinnus Valkiaisnevilla.



Kuva 8. Kiihdytyksen enimmäisäänitason SPreAD-GIS-mallinnus Kankarinjärvellä.

SPreAD-GIS:n tuloksista voidaan nähdä, että Valkiaisnevan osalta aivan ajoradan keskipisteen läheisyydessä sekä 15.2 metrin mittauspaikalla äänenpainetasot saavat lähes todenmukaisia arvoja, mutta etäisyyden kohteeseen kasvaessa äänenpainetasot laskevat erittäin nopeasti. Mallinnuksen poikkeama 30 metrin etäisyydellä on -11.92 dB(A), 100 metrin etäisyydellä -17.98 dB(A) ja 200 metrin etäisyydellä -19.68 dB(A). Taulukosta 9 voidaan huomata, että keskimääräinen poikkeama mittauksiin Valkiaisnevilla on -13.34 dB(A). Ainoa mittausetäisyys, jonka poikkeama asettuu tämän opinnäytetyön tavoitepoikkeamaan, on 15.2 metriä, missä poikkeama on -3.8 dB(A). Poikkeaman määrä kasvaa mittauspisteittäin kauemmas kuljettaessa.

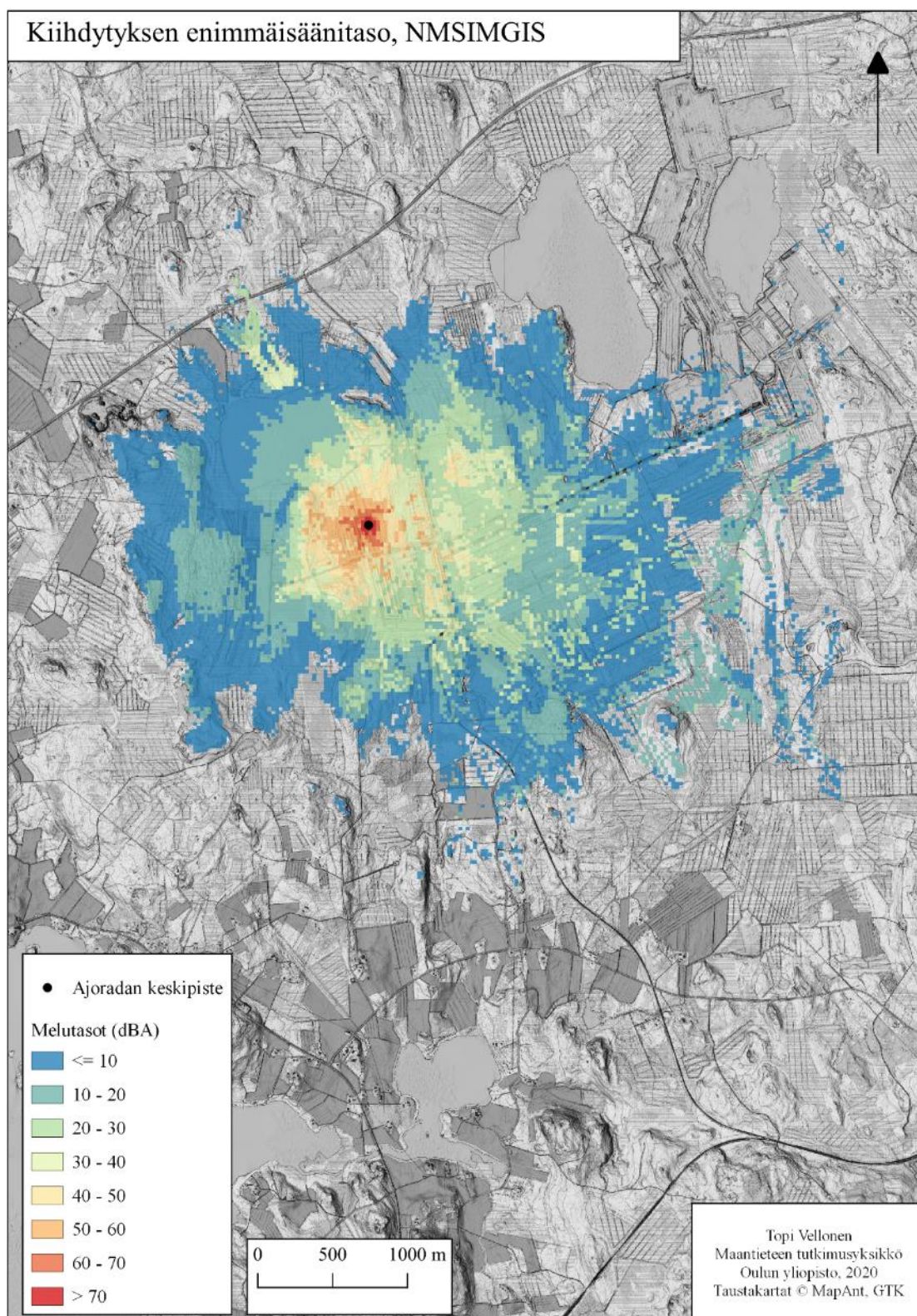
Taulukko 9. Kiihdytyksen enimmäisäänitason SPreAD-GIS-mallinnuksen tulokset ja poikkeamat vertailuarvoihin Valkiaisnevilla.

SPreAD-GIS (Valkiaisneva)			
Mittausetäisyys (m)	Mittausarvo (dBA)	Mallinnuksen tulos (dBA)	Poikkeama (dBA)
15.2	80.48	76.68	-3.8
30	71.78	59.86	-11.92
100	55.78	37.8	-17.98
200	45.75	26.07	-19.68
Keskimääräinen poikkeama			-13.34

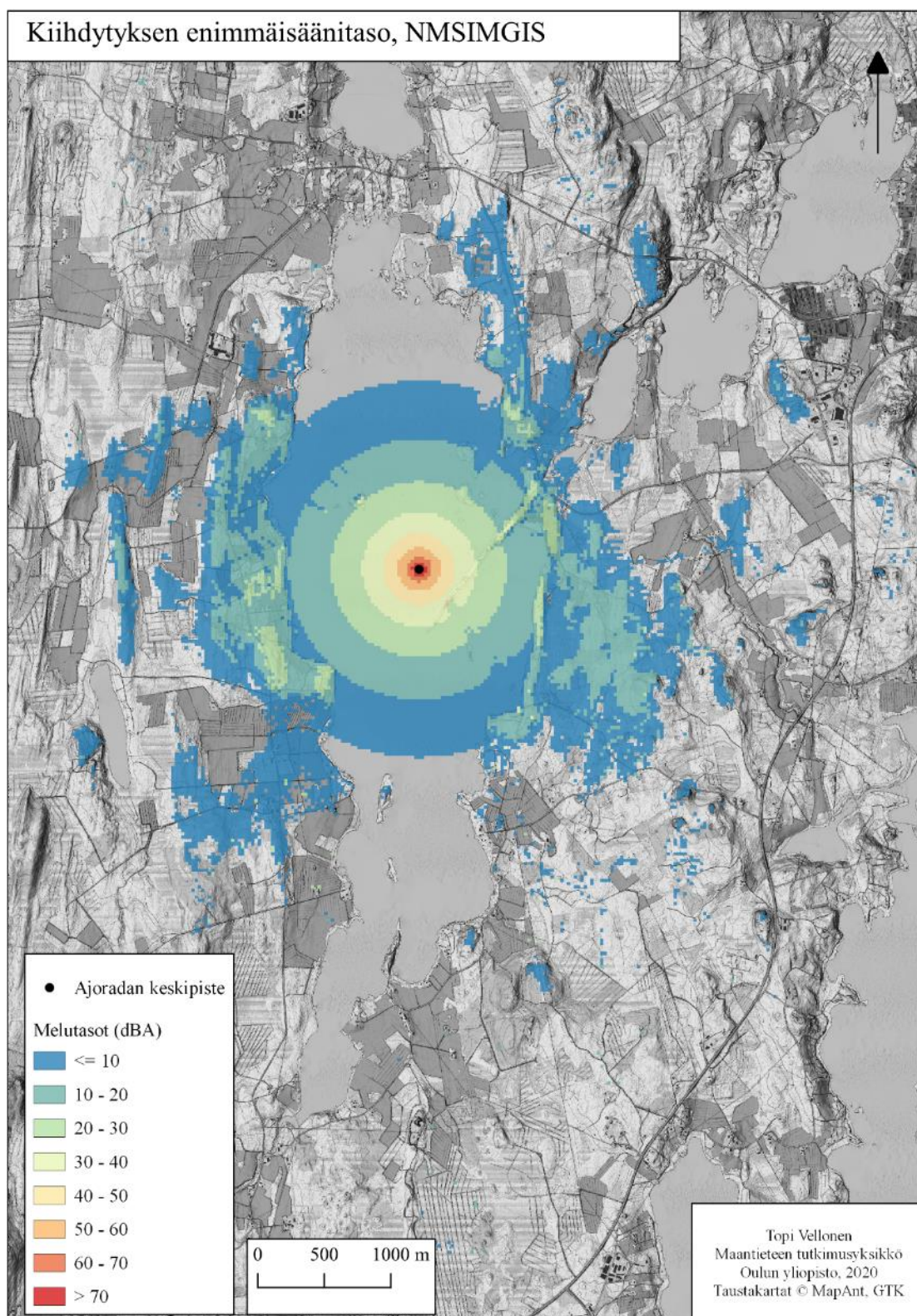
Kankarinjärven osalta mallinnustulos ei antanut millään mittauspisteellä tavoitepoikkeaman mukaisia arvoja. Taulukosta 10 voidaan huomata, että mallinnuksen poikkeama 15.2 metrin etäisyydellä on -8.22 dB(A), 30 metrin etäisyydellä -7.39 dB(A), 100 metrin etäisyydellä -8.78 dB(A) ja 200 metrin etäisyydellä -16.16 dB(A). Keskimääräinen poikkeama on -10.14 dB(A).

Taulukko 10. Kiihdytyksen enimmäisäänitason SPreAD-GIS-mallinnuksen tulokset ja poikkeamat vertailuarvoihin Kankarinjärvellä.

SPreAD-GIS (Kankarinjärvi)			
Mittausetäisyys (m)	Mittausarvo (dBA)	Mallinnuksen tulos (dBA)	Poikkeama (dBA)
15.2	81.53	73.31	-8.22
30	74.2	66.83	-7.39
100	61.87	53.09	-8.78
200	56.07	39.91	-16.16
Keskimääräinen poikkeama			-10.14



Kuva 9. Kiihdytyksen enimmäisäänitason NMSIMGIS-mallinnus Valkiaisnevalla.



Kuva 10. Kiihdytyksen enimmäisäänitason NMSIMGIS-mallinnus Kankarinjärvellä.

Taulukosta 11 voidaan tarkastella NMSIMGIS:n tuloksia verrattuna mittaustuloksiin. Valkiaisnevan osalta mallinnustulos oli kaikista suoritetuista mallinnoista tarkin. Poikkeama mittaustuloksiin oli kokonaisuudessaan vain -0.2 dB(A). NMSIMGIS:n tuloksista on tärkeää huomata myös se, että poikkeamat ovat SPreAD-GIS:siin verrattuna osittain positiivisia. Tavoitepoikkeamaa suurempia poikkeamia esiintyy Valkiaisnevan osalta 30 ja 200 metrin etäisyyksillä, mutta niissäkin poikkeama on vain hieman tavoitetta suurempi, 5.25 ja -5.57 dB(A). 15.2 metrin etäisyydellä poikkeama on vain 0.36 dB(A) ja 100 metrin etäisyydellä -0.84 dB(A).

Taulukko 11. Kiihdytyksen enimmäisäänitason NMSIMGIS-mallinnuksen tulokset ja poikkeamat vertailuarvoihin Valkiaisnevalla.

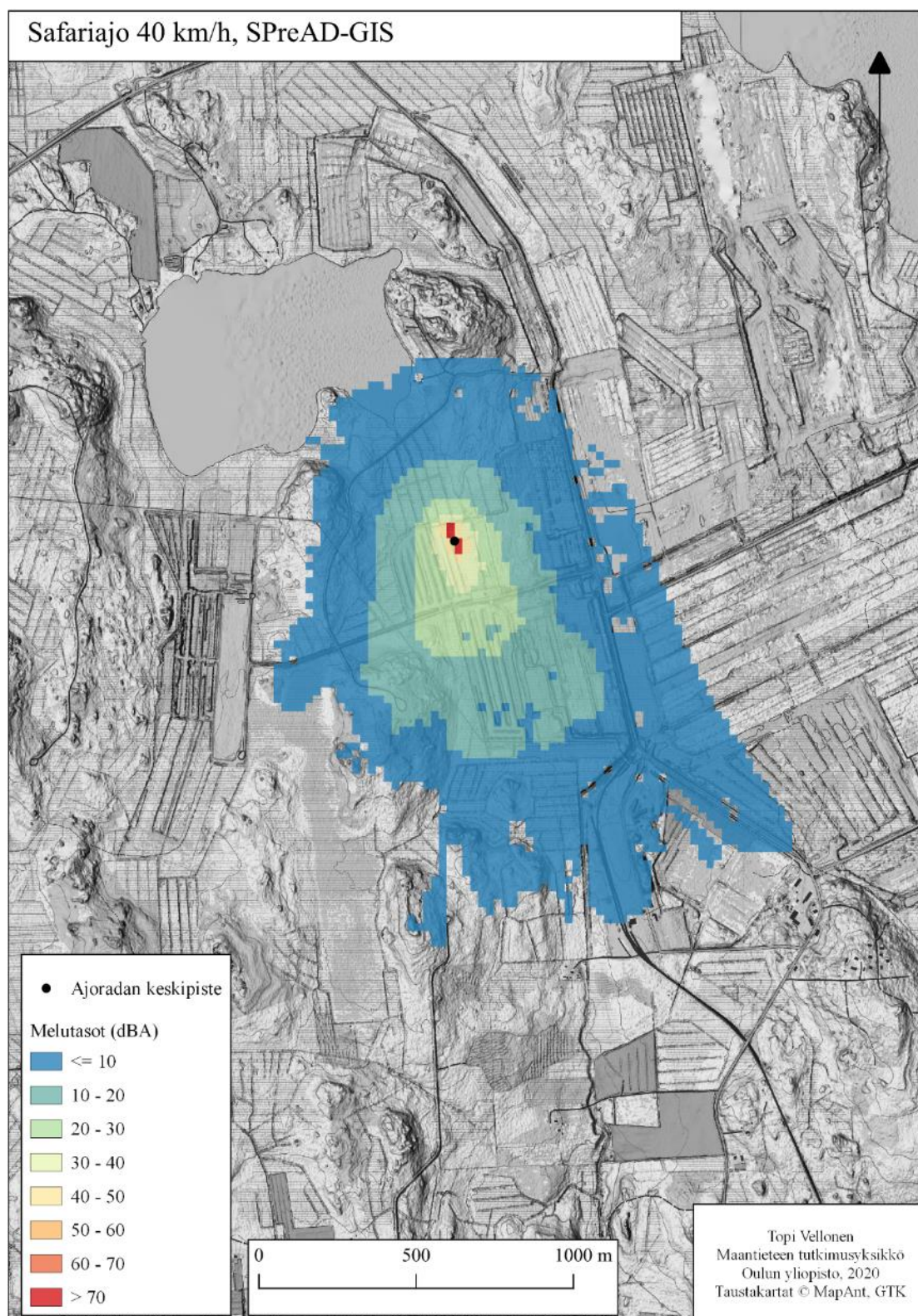
NMSIMGIS (Valkiaisneva)			
Mittausetäisyys (m)	Mittausarvo (dBA)	Mallinnuksen tulos (dBA)	Poikkeama (dBA)
15.2	80.48	80.84	0.36
30	71.78	77.03	5.25
100	55.78	54.94	-0.84
200	45.75	40.18	-5.57
Keskimääräinen poikkeama			-0.2

Taulukon 12 mukaan Kankarinjärvellä mallinnustuloksista vain 200 metrin etäisyydellä tulos poikkeaa runsaasti vertailumittauksista. Mielenkiintoista tästä tekee se, että kyseessä on jääalue, missä varsinaisia topografisia esteitä ei ääniaallon tiellä ole. 15.2 metrin etäisyydellä poikkeama on 0.07 dB(A), 30 metrin etäisyydellä 2.85 dB(A), 100 metrin etäisyydellä -2.8 dB(A) ja 200 metrin etäisyydellä -10.07 dB(A). Kummankin alueen kohdalla etenkin 15.2 metrin mittauspisteellä mallinnusarvot ovat erittäin tarkkoja.

Taulukko 12. Kiihdytyksen enimmäisäänitason NMSIMGIS-mallinnuksen tulokset ja poikkeamat vertailuarvoihin Kankarinjärvellä.

NMSIMGIS (Kankarinjärvi)			
Mittausetäisyys (m)	Mittausarvo (dBA)	Mallinnuksen tulos (dBA)	Poikkeama (dBA)
15.2	81.53	81.6	0.07
30	74.2	77.05	2.85
100	61.87	59.07	-2.8
200	56.07	46	-10.07
Keskimääräinen poikkeama			-2.49

9.2 Safariajot

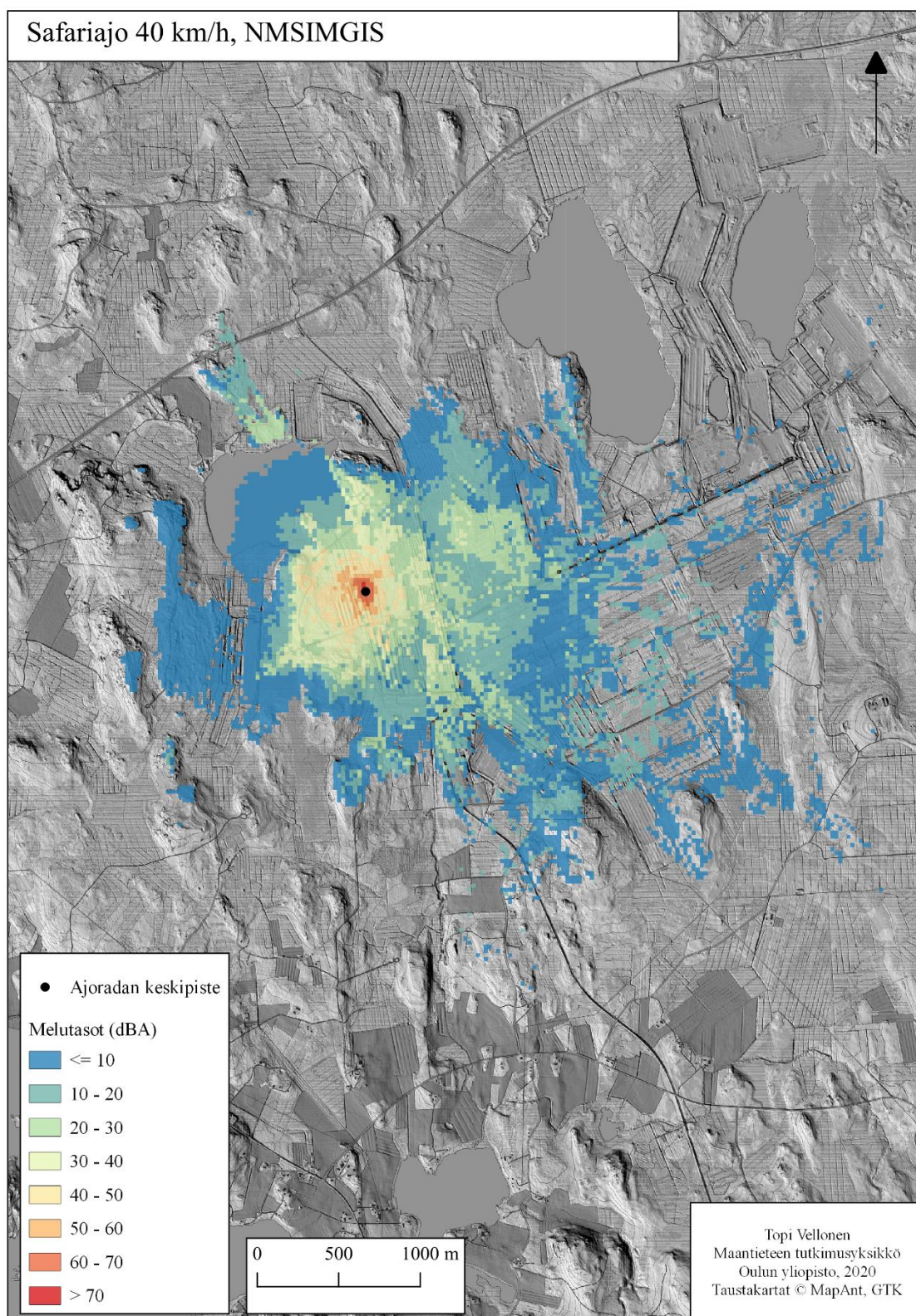


Kuva 11. Safariajojen (40 km/h) SPreAD-GIS-mallinnus Valkiaisnevalla.

Safariajajen mallinnukset antoivat tuloksena huomattavasti mittaustuloksia alhaisempia arvoja. Useampi kelkka ei aiheuta suurta muutosta äänenpainetasoissa verrattuna esimerkiksi yksittäisen kelkan mallinnukseen 40 km/h nopeudella (Liite 1). Suuret äänenpainetasot kohdistuvat melulähteiden välittömään läheisyyteen, jonka jälkeen tasot laskevat nopeasti (kuva 11). Taulukon 13 mukaan SPreAD-GIS:n mallinnuksessa 15.2 metrin etäisyydellä poikkeama on -1.65 dB(A), 30 metrin etäisyydellä -36.36 dB(A), 100 metrin etäisyydellä -29.79 dB(A), 200 metrin etäisyydellä -32.17 dB(A) ja 500 metrin etäisyydellä -39.71 dB(A). Keskimääräinen poikkeama on -27.94 dB(A). Ainoastaan 15.2 metrin etäisyydellä mallinnustulos osuu tavoitepoikkeamaan.

Taulukko 13. Safariajajen (40 km/h) SPreAD-GIS-mallinnuksen tulokset ja poikkeamat vertailuarvoihin Valkiaisnevalla.

SPreAD-GIS			
Mittausetäisyys (m)	Mittausarvo (dBA)	Mallinnuksen tulos (dBA)	Poikkeama (dBA)
15.2	78	76.35	-1.65
30	74	37.64	-36.36
100	58	28.21	-29.79
200	46	13.83	-32.17
500	41	1.29	-39.71
Keskimääräinen poikkeama			-27.94



Kuva 12. Safariajojen (40 km/h) NMSIMGIS-mallinnus Valkiaisnevilla.

NMSIMGIS:n tulokset poikkeavat SPreAD-GIS:n tavoin huomattavasti mittaustuloksista safariajojen osalta. Ääniaallot leviävät NMSIMGIS:n mallinnuksen tuloksessa tosin SPreAD-GIS:siä laajemmalle (kuva 12). Myös keskimääräinen poikkeama on huomattavasti pienempi, -13.54 dB(A). Poikkeama on 15.2 metrin etäisyydellä -8.81 dB(A), 30 metrin etäisyydellä -8.47 dB(A), 100 metrin etäisyydellä -14.15 dB(A), 200 metrin etäisyydellä -15.56 dB(A) ja 500 metrin etäisyydellä -20.73 dB(A).

Taulukko 14. Safariajojen (40 km/h) NMSIMGIS-mallinnuksen tulokset ja poikkeamat vertailuarvoihin Valkiaisnevalle.

NMSIMGIS			
Mittausetäisyys (m)	Mittausarvo (dBA)	Mallinnuksen tulos (dBA)	Poikkeama (dBA)
15.2	78	69.19	-8.81
30	74	65.53	-8.47
100	58	43.85	-14.15
200	46	30.48	-15.56
500	41	20.27	-20.73
Keskimääräinen poikkeama			-13.54

10. Pohdinta

Tuloskartoista (kuvat 7 ja 8) SPreAD-GIS:n osalta voidaan huomata etenkin tuulen vaikutus äänen kulkuun. Se näkyy Valkiaisnevan kohdalla luoteesta kaakkoon ja Kankarinjärven kohdalla idästä länteen suuntautuvana trendinä. SPreAD-GIS:n kohdalla kasvillisuuden vaikutus voi olla syynä nopeaan ja kokonaisvaltaiseen äänen vaimentumiseen, mutta yksittäisten maanpeiteluokkien vaikutusta on vaikeaa arvioida. SPreAD-GIS:n tulos on kokonaisuudessaan äänenpaineeltaan niin alhainen, että yksittäisten maanpeitetyyppien vaikutus ei suoranaisesti kartoissa ilmene. Kasvillisuuden vaikutus on kuitenkin selkeästi nähtävissä, kun verrataan Valkiaisnevan tuloksia Kankarinjärven tuloksiin, missä pääasiallinen maanpeite oli mittauspaikalla lumi. Kankarinjärvellä, missä kasvillisuuden vaikutus on mittausalueella minimissään, pääasialliset ääniaallon kulkuun vaikuttavat tekijät ovat ilmakehän absorptio, leviämismuutos sekä tuuli. Kankarinjärven tuloskartasta (kuva 8) voidaan huomata myös selkeästi maa-alueiden vaikutus äänen kulkuun. Mainitsemisen arvoista on myös se, että vaikka Kankarinjärvellä ei ole kasvillisuuden vaikutusta, ovat mallinnustulokset siitä huolimatta erittäin alhaisia. Lähempänä ajorataa äänenpainetasot laskevat etäisyyden kasvaessa hitaammin ja tasaisemmin, kuin Valkiaisnevalla, missä kasvillisuuden vaikutus on kattavammin läsnä. Tulokseen voi vaikuttaa lumen puuttuminen maanpeitteen luokittelussa. Maanpeitteen uudelleenluokittelussa vesialueet luokiteltiin luokkaan HEB (*herbaceous or grassland*). Mallinnusta testattiin useammalla eri luokittelulla, mutta luokkien vaihtaminen ei oleellisesti vaikuttanut mallinnustuloksiin. Syytä nopeaan äänenpainetason laskuun pohdittiin myös Douglas Longin kanssa, joka on SMT:n parissa paljon työskennellyt henkilö. Sain häneen yhteyden työkalupakin ympärille syntyneen keskustelufoorumin kautta. Hänen mukaansa syynä alhaisiin arvoihin voi olla mallin muodostamat taajuuspainotukset (Douglas Long, suullinen lähde 2020). Poikkeamat ovat Kankarinjärvellä kuitenkin pienempiä verrattuna Valkiaisnevaan.

NMSIMGIS antoi tuloksena huomattavasti todenmukaisempia arvoja verrattuna SPreAD-GIS:siin. Tuloskartasta (kuva 9) voidaan huomata, että melu leviää laajemmalle alueelle, kuin SPreAD-GIS:ssä ja koska malli ei ottanut parametrina tuuleen liittyviä arvoja, ei sen vaikutustakaan voida tuloksessa nähdä. Äänen leviämiseen laajemmalle voimakkaampana voi vaikuttaa esimerkiksi se, että kasvillisuuden vaikutusta

ei tässä mallissa suoranaisesti oteta huomioon. Tulokartasta ilmenee myös, että pääasiallinen vaimentava tekijä pitkällä matkalla on pinnanmuotojen vaihtelu. Vaihtelut estävät ääniaaltojen kulkua tehokkaasti (Keyel ym. 2018: 79). Mielenkiintoista NMSIMGIS:n tuloksissa on myös Kankarinjärven osalta kokonaisvaltainen vaimentuminen kaukana ajoradasta jään osalta (kuva 10). Karttaesityksestä voidaan huomata, että verrattuna SPreAD-GIS:n tuloksiin, vaikka tulos onkin todenmukaisempi, tapahtuu ääniaallon täydellinen vaimentuminen Kankarinjärvellä huomattavasti aikaisemmin. Tosin ääniaaltojen voidaan huomata osuvan maa-alueilla eri pinnanmuotoihin hyvin kaukana mittausalueesta. Tähän voi vaikuttaa esimerkiksi vastaanottajan korkeus maanpinnasta. Mallinnuksissa ei ole otettu huomioon taustamelun määrää ja kuten Liikosen ym. (2007) mittausten virhelähteissä mainitaan, ei mittaustuloksetkaan enää 500 metrin etäisyydellä ole luotettavia ulkoisten tekijöiden seurauksena. Ero mallinnusten välillä on kuitenkin huomattava ja mainitsemisen arvoinen. Maanpinnan koostumuksesta johtuvat impedanssi ja virtausresistiivisyys ovat nähtävissä Valkiaisnevan mittauspaikalla mallinnustuloksen epätasaisuutena. Safariajojen osalta tulokset olivat odotuksiin nähden poikkeavia. Mallinnuksia tehdessä oletus oli, että useamman kelkan ryhmä aiheuttaisi suurempia äänenpainetasoja, mutta mallinnusten tuloksissa kyseistä ilmiötä ei ollut nähtävissä. Tulokset poikkesivat huomattavasti vertailuarvoista kummankin mallinnusmenetelmän osalta. Vastaavia tuloksia on saatu myös muissa tutkimuksissa. Yksittäinen melunlähde voi olla huomattavasti häiritsevämpi tekijä verrattuna useampaan samanaikaiseen melunlähteeseen (Proto ym. 2016: 847).

Tulosten perusteella voidaan todeta, että etenkin NMSIMGIS voisi soveltua moottorikelkkojen melun mallintamiseen jatkossa. Verrattuna SPreAD-GIS:n tuloksiin, NMSIMGIS:n tulosten poikkeama vertailuarvoihin oli huomattavasti vähäisempää. Etenkin kiihdytysten enimmäisäänitasojen osalta tulos oli hyvin tarkka. Syytä SPreAD-GIS:n tuottamien äänenpainetasojen alhaisuuteen on vaikeaa arvioida. Syynä voivat olla esimerkiksi käytetty aineisto tai valitut äänispektriarvot. Mallien toimintaan vaikuttaa oleellisesti myös ArcMapin versio, kuten myös itse työkalun versio. Työkalun toimivuus ja tulokset ovat vaihdelleet jokaisen ArcMapin versiopäivitysten myötä. Työkalupakin uusimmissa versioissa algoritmeja on muutettu ArcMapin Spatial Analyst -lisäosan

yhteensopimattomuuden vuoksi, mikä on vaikuttanut mallinnusten tuloksiin SPreAD-GIS:n osalta huomattavasti. SPreAD-GIS:n toimivuutta on vaikeaa todentaa myöskaan kirjallisuuden kautta, koska varsinaisia kalibroitimittauksia ei ole suoritettu (Reed ym. 2012: 5). Jatkon kannalta olisi tärkeää tehdä kyseisiä mittauksia, jotta mallin tulosten todenmukaisuus voitaisiin tarkistaa.

Tulevaisuudessa olisi tärkeää, että tässä opinnäytetyössä käytettyjä työkaluja kehitettäisiin eteenpäin. Työkalun päivittämisestä on tehnyt erittäin hankalaa ylläpitäjä Sasha Keyelin mukaan se, että ArcMapin päivitysten myötä myös mallien tuloksissa tapahtuu muutoksia. Eli käytännössä työkaluja on pitänyt päivittää ja testata jokaisen ArcMap -versiopäivityksen jälkeen. Keyelin siirryttyä uuteen virkaan hän lopetti työkalupakin ylläpidon (Keyel 2020). Viimeisin työkalupakin versio on vuodelta 2017. Hankaluuksia työkalujen käytössä aiheuttaa myös se, että sitä on mahdollista käyttää vain, mikäli käyttäjällä on toimiva lisensoitu versio Esri:n ArcMap -ohjelmistosta. Itse työkalupakki ja sen sisältö ovat avoimen lähdekoodin alaisia. Tulevaisuudessa olisi siis tarve esimerkiksi SMT:n pohjalta muodostetulle itsenäiselle avoimen lähdekoodin melumallinnustyökalulle. Yksi mahdollisuus olisi myös mallien koodien muuttaminen niin, että niiden käyttö olisi mahdollista jossain avoimen lähdekoodin alaisessa GIS -ohjelmistossa, kuten esimerkiksi QGIS:ssä. Samalla työkalujen toimintaperiaatteita voitaisiin muuttaa niin, että Yhdysvaltojen ulkopuolelta saatavilla olevien aineistojen käyttäminen mallinuksissa helpottuisi. Tässä opinnäytetyössä käytetyt aineistot vaativat melko laajoja muokkauksia, jotta ne sopivat valittujen menetelmien käyttöön. Esimerkiksi maanpeiteaineiston uudelleenluokittelussa oli välttämätöntä tehdä henkilökohtaisia päätöksiä tiettyjen luokkien osalta, koska luokat eivät vastanneet täysin toisiaan. Esimerkiksi SPreAD-GIS:n kohdalla vesialueet oli muutettava luokkaan HEB (*herbaceous or grassland*), koska lunta ei ollut kyseisessä mallissa omana luokkana. NMSIMGIS:n kohdalla kompromissien määrä oli vähäisempää, koska työkalun käyttämiä luokkia oli enemmän. Olisi tärkeää, että melunlähteenä voitaisiin käyttää myös viivamaisia kohteita pistekohteiden lisäksi.

Mallinnuksiin kulunut aika oli pitkä. Kulunutta aikaa on vaikeaa kertoa tarkkaan, koska mallinnukset suoritettiin ArcMapin ulkopuolella Python-skriptin avulla, eikä kulunutta aikaa ilmoitettu. Kyse on kuitenkin 14 mallinnuksen osalta noin yhdestä

tunnista. Mallinnuksiin käytetty tietokone oli tehokas, eli vähemmän tehokkaalla tietokoneella mallinnuksiin kuluva aika voi olla huomattavasti pidempi. Melunlähteiden määrä vaikuttaa myös oleellisesti mallinnusaikaan (Reed ym. 2012: 5).

Lisämittausten ja kalibroinnin myötä käytettyjä mallinnusmenetelmiä voitaisiin jalostaa niin, että tulosten tarkasteluun otettaisiin mukaan melun vaikutusalueelle sijoittuvat ihmiset ja ihmisten määrä. Kyseinen lähestymistapa on yksi yleisimmistä melumallinnuksen sovellutuksista (esim. Farcas & Sivertun 2009; Bocher ym. 2019). Täten olisi mahdollista soveltaa työkaluja esimerkiksi yhdyskuntasuunnittelun tarpeisiin. Melun vaikutusta eläimiin voidaan tarkastella käytetyillä työkaluilla hyvin etenkin siksi, että niiden avulla on mahdollista eritellä yksittäisiä taajuusalueita. Taajuusalueiden erittely mahdollistaa esimerkiksi vertailun eri eläinlajien äänentuoton taajuuksiin ja kuulo-ominaisuuksiin, jolloin voidaan pohtia tuotetun ja vastaanotetun äänen peittymistä (Keyel ym. 2017: 58).

11. Yhteenveto

Tässä tutkielmassa mallinnettiin SMT-työkalupakin NMSIMGIS sekä SPreAD-GIS-työkaluilla moottorikelkkojen melua. Mallinnettuja äänenpainetasoja verrattiin Liikosen ym. (2007) metsäisessä maastossa sekä järven jäällä tekemiin moottorikelkkojen melumittauksiin. Mallinnusten tulosten perusteella voidaan todeta, että etenkin NMSIMGIS voisi soveltua jatkossakin moottorikelkkojen melun mallintamiseen. SPreAD-GIS antoi tuloksena liian alhaisia äänenpainetasoja. Tulevaisuudessa olisi tärkeää, että malleja kalibroitaisiin empiiristen mittausten avulla. Mallien todenmukaisuutta ei tämän tutkielman lisäksi ole juurikaan arvioitu vertailemalla tuloksia maastomittauksiin. Todentamisen jälkeen työkalujen jatkuvampi käyttö olisi mahdollista ja sen myötä voitaisiin arvioida esimerkiksi melulle altistuvien ihmisten määrää.

12. Haasteet

Suurin haaste opinnäytetyötä tehdessä oli käytettävien mallinnustyökalujen epävakaus. Hyvin suuri osa työhön käytetystä ajasta kului erilaisiin testauksiin ja virhelähteiden korjaamiseen. Ratkaisun löytämiseksi oli oleellista, että mallinnuksia varten saatiin käyttöön vanhempi versio ArcMap -ohjelmistosta. Myös työkalun käyttöön perehtyneet Douglas Long ja Sasha Keyel antoivat tärkeitä ohjeita työkalujen toiminnan kannalta. Aiheeseen liittyvän kirjallisuuden vähäisyys aiheutti ongelmia etenkin mallinnustulosten oikeellisuuden tarkastelussa, koska vertailukohtia ei ollut juurikaan saatavilla. Moottorikelkka melunlähteenä on myös hyvin vähän tutkittu aihe.

Maantieteen tutkimusyksikön ja kirjoittajan työpaikan puolesta saatavilla oleva ohjaus oli aiheen tiimoilta hyvin rajallista hyvin spesifin aiheen aiheuttamista syistä. Sen vuoksi opinnäytetyön tekijän oli perehdyttävä kaikkiin työn osa-alueisiin itsenäisesti ja muodostettava asianmukaiset menetelmät tulosten tarkasteluun. Se itsessään pidensi menetelmien suunnitteluun käytettyä aikaa, mikä taas aiheutti suppeamman perehtymisen aiheen teoriaan. Liikosen ym. (2007) mittaukset olivat vertailtavuudeltaan suppeat, koska äänen etenemiseen liittyvää vaimentumista oli kuvattu vain kiihdytyksen enimmäisäänitasojen ja safariajojen osalta. Safariajoista aineistoa ei myöskään ollut saatavilla taulukkomuodossa, mikä aiheutti epävarmuutta. Näiden puutteiden takia muilla nopeuksilla tehtyjä mallinnuksia ei sisällytetty tulosten tarkasteluun. Käytettyjen aineistojen osalta etenkin Corine-maanpeiteaineiston karkea resoluutio aiheutti sen, että muut aineistot oli muutettava yhtä karkeaan resoluutioon. Tämä saattoi aiheuttaa mallinuksissa vääristymiä.

Lähteet

- Akay, A. E. & H. H. Acar (2019). Using GIS techniques for modeling noise propagation from mechanized harvesting equipment. *European Journal of Forest Engineering*, s. 92-98.
- Basner, M., W. Babisch, A. Davis, M. Brink, C. Clark, S. Janssen & S. Stansfeld (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), s. 1325-1332.
- Bentes, F. M. & J. G. Slama (2011). Sensitivity analysis of airport noise using computer simulation. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 3(3), s. 295-299.
- Best, V., C. Conroy, & G. Jr. Kidd (2020). Can background noise increase the informational masking in a speech mixture? *Journal of the Acoustical Society of America*, 147(2), s. 144-150.
- Biagi, L. & M. Brovelli & M. Scuratti (2001). *Environmental noise modeling within an open source GIS*, Polytechnic of Milan, Engineering Faculty, Como.
- Bocher, E., G. Guillaume, J. Picaut, G. Petit & N. Fortin (2019). NoiseModelling: an open source GIS based tool to produce environmental noise maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(3), 30 s.
- Borenus, J., E. Lampio, K. Pesonen, T. Jauhiainen, J. Nuotio & I. Pyykkö (1981). *Akustiikan perusteet*, 176 s. Insinööritieto Oy, Helsinki.
- Campbell, K. A., D. S. Proppe, J. V. Congdon, E. N. Scully, S. K. Miscler & C. B. Sturdy (2019). The effects of anthropogenic noise on feeding behaviour in black-capped chickadees (*Parus atricapillus*). *Behavioural Processes*, 158, s. 53-58.
- De, A. K. & A. K. De (2009). *Environmental engineering*. 191 s. New Delhi: New Age International.
- Dowling, A. P. & J. E. Ffowcs Williams (1983). *Sound and sources of sound*. 231 s. Ellis Horwood, Chichester.
- Euroopan komissio (1996). Future Noise Policy, *European Commission Green Paper*, COM(96) 540 final, Bryssel.
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/49/EY ympäristömelun arvioinnista ja hallinnasta (2002). *Euroopan yhteisöjen virallinen lehti*, 2002.
- Euroopan ympäristökeskus (2019). Environmental Noise in Europe - 2020. *Publications Office of the European Union*, Luxemburg, 2020.

- Farcas, F. (2008). Road Traffic Noise, A study of Skåne region, Sweden. *Department of Computer and Information Science International Master's Programme in Geoinformatics Linköping University*, 89 s.
- Farcas, F. & Å. Sivertun (2009). Road traffic noise: GIS tools for noise mapping and a case study for Skåne region. *Isprs Workshop On Quality, Scale And Analysis Aspects Of City Models*, Lund, Sweden, December 3-4, 2009.
- Farrelly, F. & G. Brambilla (2003). Determination of uncertainty in environmental noise measurements by bootstrap method. *Journal of Sound and Vibration*, 268(1), s. 167-175.
- Francesc, A., A. R. Ma, O. Ferran & S. J. Claudi (2018). Detection of anomalous noise events for real-time road-traffic noise mapping: The Dynamap's project case study. *Noise Mapping*, 5(1), s. 71-85.
- Ghadirian, O., H. Moradi, H. Madadi, A. Lotfi & J. Senn (2019). Identifying noise disturbance by roads on wildlife: A case study in central Iran. *SN Applied Sciences*, 1(8), s. 1-11.
- Hallituksen esitykseksi eduskunnalle laiksi ajoneuvolain 16 ja 64 a §:n muuttamisesta sekä eräiksi siihen liittyviksi laeiksi HE 185/2018 (2018). Finlex, Helsinki. <<https://www.finlex.fi/fi/esitykset/he/2018/20180185>>. 11.10.2018.
- Harrison, R. T., R. N. Clark, G. H. Stankey (1980). Predicting impact of noise on recreationist. Forest Service. *U.S Departments of agriculture equipment development center*, 32 s. San Dimas, CA.
- Herva, P. (2000). Moottorikelkkailureittien suunnittelu ja ympäristövaikutukset. *Lapin ympäristökeskuksen moniste 28*, Lapin ympäristökeskus.
- Hume, K., M. Brink & M. Basner (2012). Effects of environmental noise on sleep. *Noise and Health*, 14(61), s. 297-302.
- Injaian, A. S., C. C. Taff & G. L. Patricelli (2018). Experimental anthropogenic noise impacts avian parental behaviour, nestling growth and nestling oxidative stress. *Animal Behaviour*, 136, s. 31-39.
- Jättimäiset moottorikelkat tulevat – kuljetukseen mahtuu jopa parinkymmenen hengen ryhmä kerralla (2019). Yle, Rovaniemi. <<https://yle.fi/uutiset/3-10579199>>, 7.1.2019.
- Keyel, S. (2020). Sound Mapping Tools help. Henkilökohtainen sähköpostiviesti. 16.3.2020.

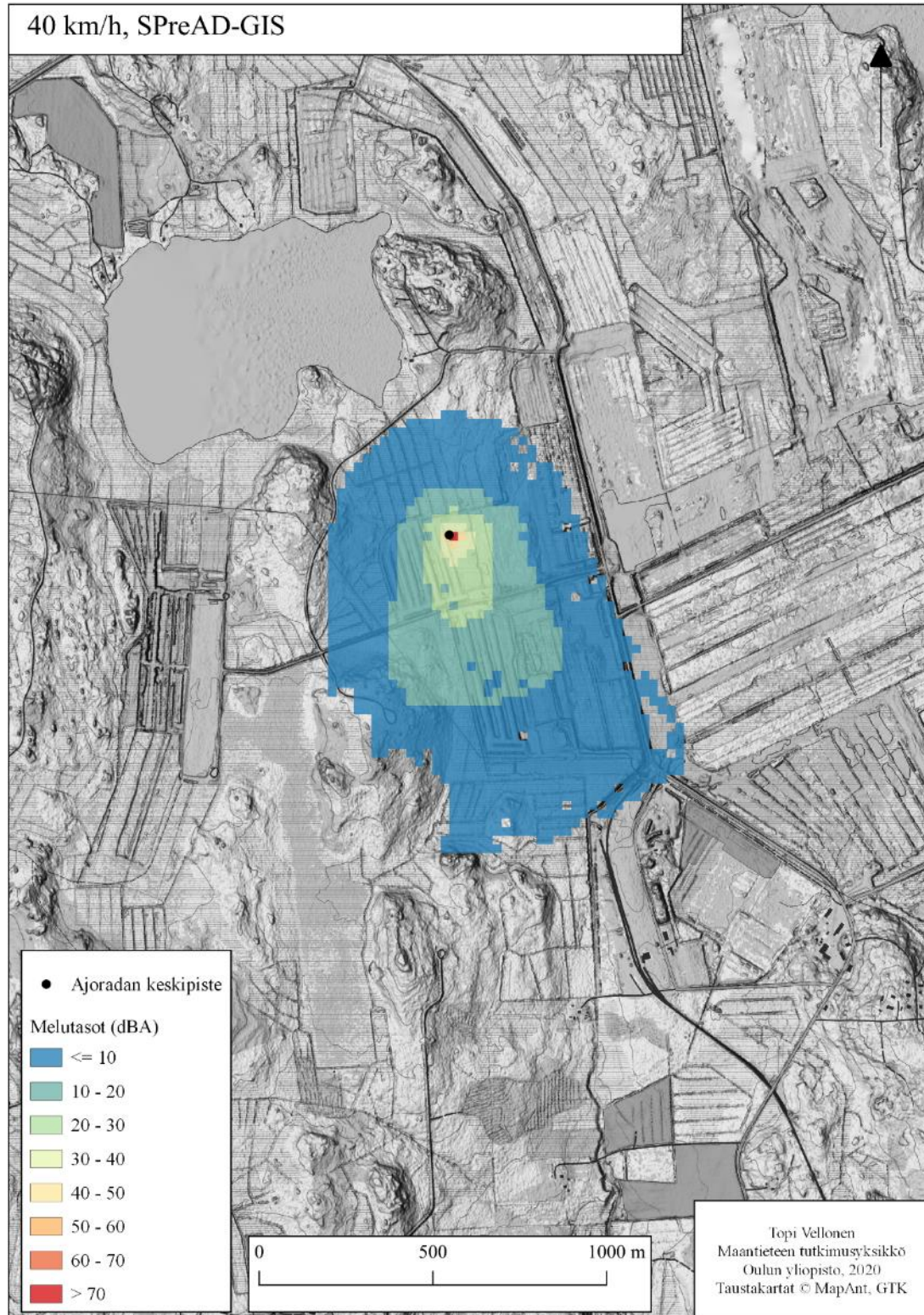
- Keyel, A. C. & S. E. Reed (2017). *Sound Mapping Tools: an ArcGIS toolbox for modeling the propagation of sounds in a wildland setting*. 47 s. Versio 4.4. Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Keyel, A. C., S. E. Reed, M. F. McKenna & G. Wittemyer (2017). Modeling anthropogenic noise propagation using the Sound Mapping Tools ArcGIS toolbox. *Environmental Modelling and Software*, 97, s. 56-60.
- Keyel, A. C., S. E. Reed, K. Nuessly, E. Cinto-Mejia, J. R. Barber & G. Wittemyer (2018). Modeling anthropogenic noise impacts on animals in natural areas. *Landscape and Urban Planning*, 180, s. 76-84.
- Kleist, N. J., R. P. Guralnick, A. Cruz, C. A. Lowry & C. D. Francis (2018). Chronic anthropogenic noise disrupts glucocorticoid signaling and has multiple effects on fitness in an avian community. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, 115(4), s. 648-657.
- Knight, R. L. & K. J. Gutzwiller (1995). *Wildlife and recreationists: Coexistence through management and research*. 372 s. Island Press, Washington, D.C.
- Kuyek, D. & C. Perkins (2012). A noise analysis of the Loki Hybrid Electric Snowmobile, *Defence Research and Development Canada – Contract report*, 16 s.
- Lahti, T. (1979). *Äänen eteneminen maanpinnalla*. 70 s. Helsingin teknillinen korkeakoulu, Espoo.
- Larson, C. L., S. E. Reed, A. M. Merenlender, K. R. Crooks (2016). Effects of recreation on animals revealed as widespread through a global systematic review. *PLoS ONE*, 11(12), 21 s.
- Lewis, R. C., R. R. M. Gershon & R. L. Neitzel (2013). Estimation of permanent noise-induced hearing loss in an urban setting. *Environmental science & technology*, 47(12), s. 6393-6399.
- Liikenne- ja viestintäministeriön asetus traktorien, moottorikäoneiden ja maastoajoneuvojen, niiden perävaunujen sekä hinattavien laitteiden rakenteesta ja varusteista 1251/2002 (2002). Finlex, Helsinki.
<<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2002/20021251>>. 11.12.2002.
- Liikennekäytössä olevat ajoneuvot neljännesvuosittain 2008-2020 (2020). Traficom, Helsinki.
- Liikonen, L., M. Alanko, S. Jokinen, I. Niskanen ja L. Virrankoski (2007). Moottorikelkkojen melu. *Suomen ympäristö 33/2007*, Ympäristöministeriö.

- Liikonen, L. & J. Rautio (2004). Moottorikelkkaliikenteen melu – Esiselvitys. *Suomen ympäristö 712*, Ympäristöministeriö.
- Lohr, B., T. F. Wright & R. J. Dooling (2003). Detection and discrimination of natural calls in masking noise by birds: Estimating the active space of a signal. *Animal Behaviour*, 65(4), s. 763-777.
- Mathews, A. J., M. Haffner & E. A. Ellis (2017). GIS-based modeling of tornado siren sound propagation: Refining spatial extent and coverage estimations. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 23, s. 36-44.
- Miers, S. A., R. D. Chalgren & C. L. Anderson (2000). Noise and Emission Reduction Strategies for a Snowmobile. *SAE Transactions*, 109, s. 1891-1896.
- Moottorikelkka etenee kuin kuiskaus – Tässä menee historian ensimmäinen sähkökelkkasafari (2018). Yle, Rovaniemi. <<https://yle.fi/uutiset/3-10118343>>, 15.3.2018.
- Morillas, J., G. Gozalo, D. González, P. Moraga & R. Vilchez-Gómez (2018). Noise pollution and urban planning. *Current Pollution Reports*, 4(3), s. 208-219.
- Munjal, M. L. (2013). *Noise And Vibration Control*. 277 s. World Scientific Publishing Co. Pte Ltd, Singapore
- Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep Medicine Reviews*, 11(2), s. 135-142.
- Ndrepepa, A. & D. Twardella (2011). Relationship between noise annoyance from road traffic noise and cardiovascular diseases: A meta-analysis. *Noise and Health*, 13(52), s. 251-259.
- Parks, S. E., C. W. Clark & P. L. Tyack (2007). Short- and long-term changes in right whale calling behavior: The potential effects of noise on acoustic communication. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(6), s. 3725-3731.
- Pepper, I. L., C. P. Gerba & M. L. Brusseau (2006). *Environmental & pollution science*. 2. p. 532 s. Elsevier/Academic Press, Amsterdam, Boston.
- Pirinen, P., H. Simola, J. Aalto, J-P. Kaukoranta, P. Karlsson & R. Ruuhela (2012). *Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010*, Ilmatieteen laitos, raportteja 2012:1.
- Prezelj, J. & J. Murovec (2017). Traffic noise modelling and measurement: Inter-laboratory comparison. *Applied Acoustics*, 127, s. 160-168.

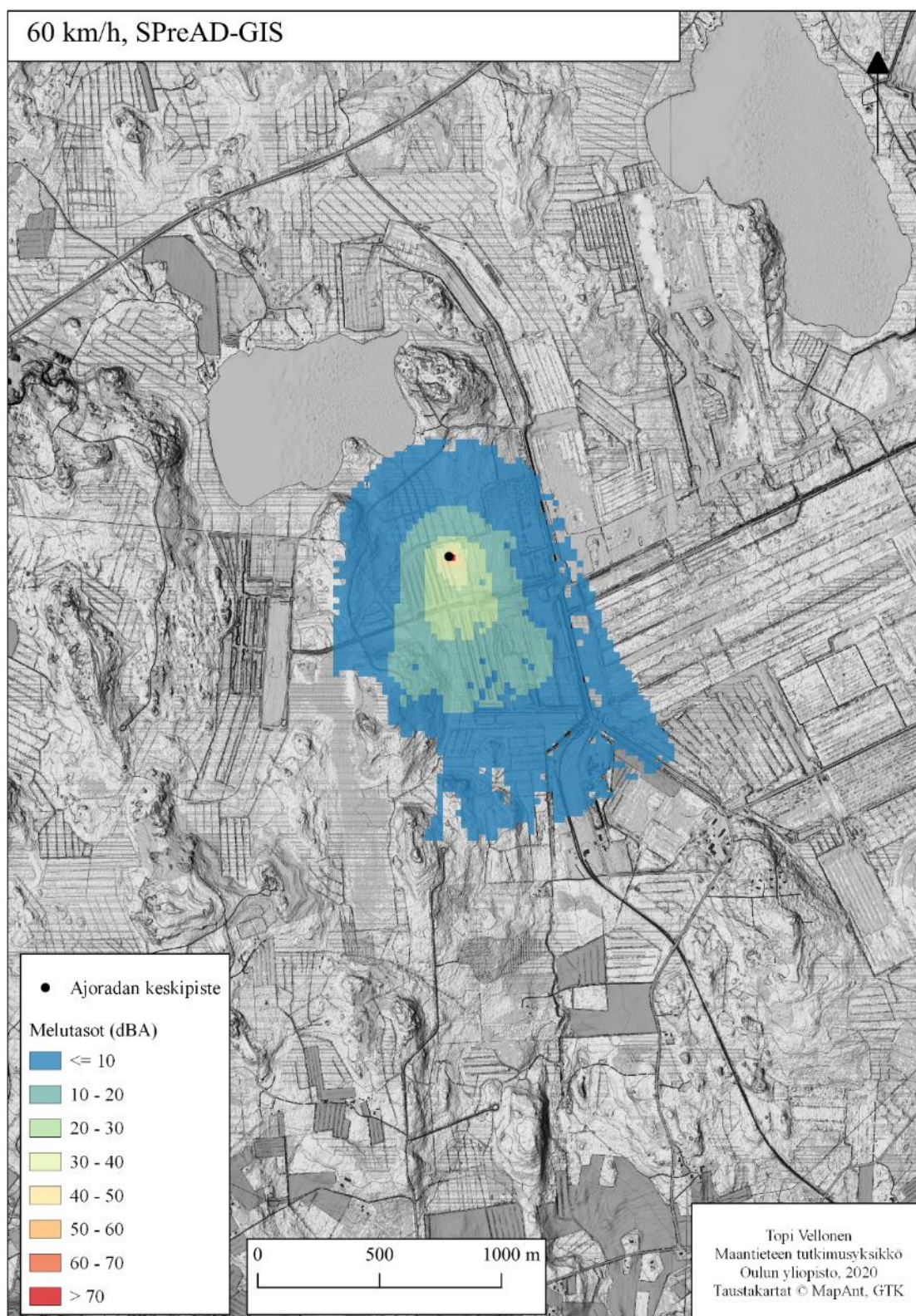
- Proto, A. R., S. Grigolato, O. Mologni, G. Macrì, G. Zimbalatti & R. Cavalli (2016). Modelling noise propagation generated by forest operations: A case study in Southern Italy. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 223, s. 841-848.
- Päivänen, J., P. Leppänen, L. Virrankoski & R. Jounila (2009). Moottorikelkkävylien tavoiteverkko - Valtakunnalliset suuntaviivat verkon suunnittelun tueksi. *Ympäristöministeriön raportteja 3*, 2009.
- Reed, S. E., J. L. Boggs. & J. P. Mann (2012). A GIS tool for modeling anthropogenic noise propagation in natural ecosystems. *Environmental Modelling and Software*, 37(C), s. 1-5.
- Rekisterissä olevat ajoneuvot ajoneuvoluokittain ja kunnittain (2020). Traficom, Helsinki.
<https://www.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannantilastot?toggle=Ajoneuvojen%20tietoja%20haltijan%20kotikunnan%20mukaan>. 31.3.2020.
- Rey Gozalo, G. & J. M. Barrigón Morillas (2017). Perceptions and effects of the acoustic environment in quiet residential areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(4), s. 2418-2429.
- Rolland, R. M., S. E. Parks, K. E. Hunt, M. Castellote, P. J. Corkeron, D. P. Nowacek & S. D. Kraus (2012). Evidence that ship noise increases stress in right whales. *Proceedings of the Royal Society B*, 279(1737), s. 2363-2368.
- SAE (2003). *Maximum Exterior Sound Level for Snowmobiles*. SAE J192. Tarkistettu 03/2003.
- SAE (1983). *Operational Sound Level Measurement Procedure for Snow Vehicles*. SAE J1161. Tarkistettu 03/1983.
- Scott, D., J. Dawson & B. Jones (2008). Climate change vulnerability of the US Northeast winter recreation– tourism sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13(5), s. 577-596.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), s. 379-423.
- Sharma, A., R. Vijay, V. Sardar, R. Sohony & A. Gupta (2010). Development of noise simulation model for stationary and mobile sources: A GIS-based approach. *Environmental Modeling & Assessment*, 15(3), s. 189-197.
- Starck, J. & L. Teräsvirta (2009). *Melu*. 88 s. Työterveyslaitos, Helsinki.
- Stošić, L. & L. Blagojević (2011). Environmental noise and mental disturbances in urban population. *Acta Medica Medianae*, 50(3), s. 34-39.

- Stoter, J., H. de Kluijver & V. Kurakula (2008). 3D noise mapping in urban areas. *International Journal of Geographical Information Science*, 22(8), s. 907-924.
- Suárez, E. & J. Barros (2014). Traffic noise mapping of the city of Santiago de Chile. *Science of the Total Environment*, 466-467, s. 539-546.
- SYKE (2006). Corine maanpeite 2006. <<http://www.syke.fi/avointieto>>, 17.3.2020.
- Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista 993/1992 (1992). Finlex, Helsinki. <<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19920993>>, 29.10.1992.
- WHO (2011). Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe, <http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf>.
- Wiley, R. H. (2015). *Noise Matters: The Evolution of Communication*. 502 s. Harvard University Press.
- YK (1972). United Nations Conference on the Human Environment. *Yhdistyneet kansakunnat*, Stockholm, Sweden, 2007.
- Zhao, W., E. Liu, H. J. Poh, B. Wang, S. Gao, C. E. Png & S. H. Chong (2017). 3D traffic noise mapping using unstructured surface mesh representation of buildings and roads. *Applied Acoustics*, 127, s. 297-304.

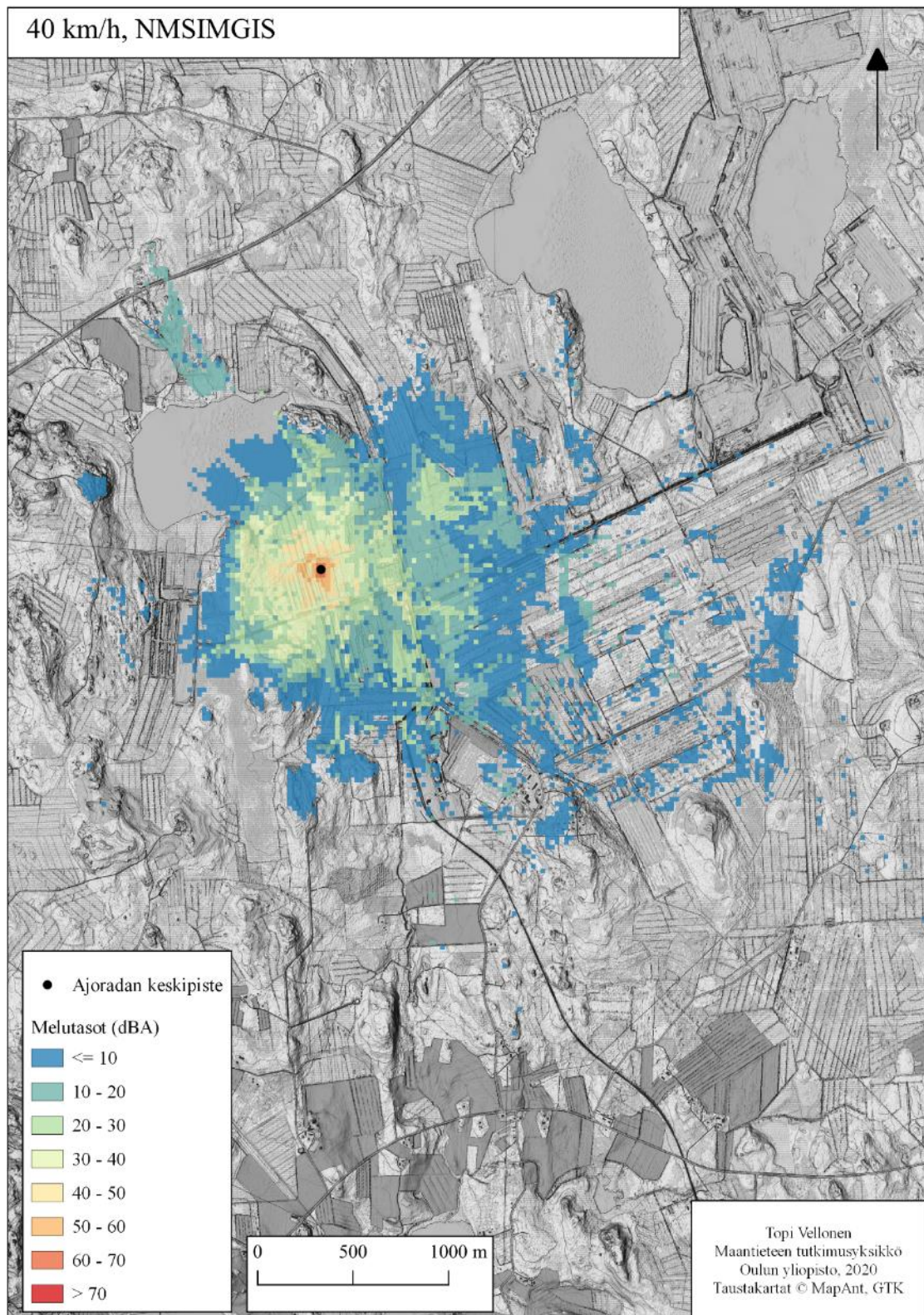
Liitteet



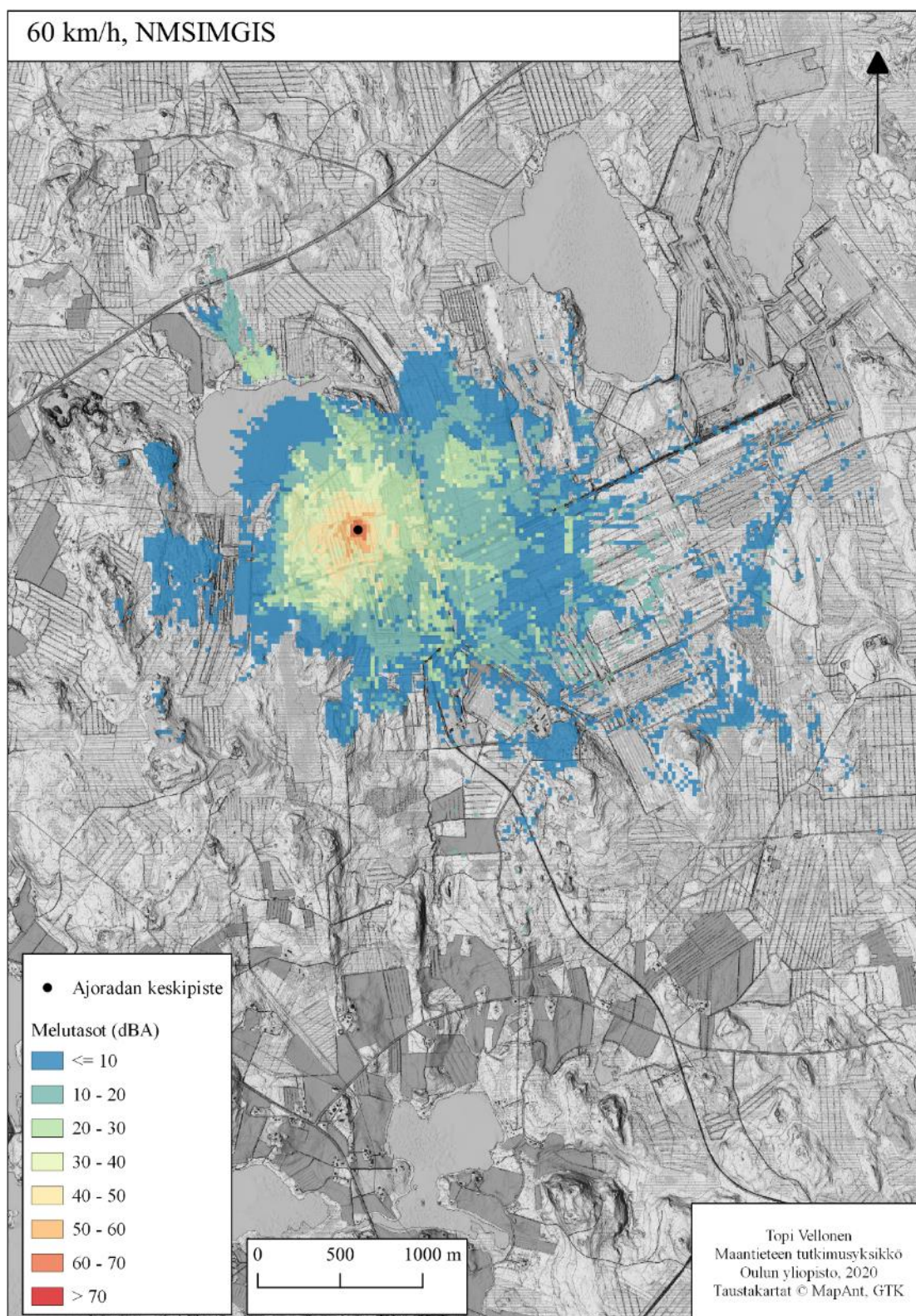
Liite 1. SPreAD-GIS-mallinnus 40 km/h nopeudella Valkiaisnevalla.



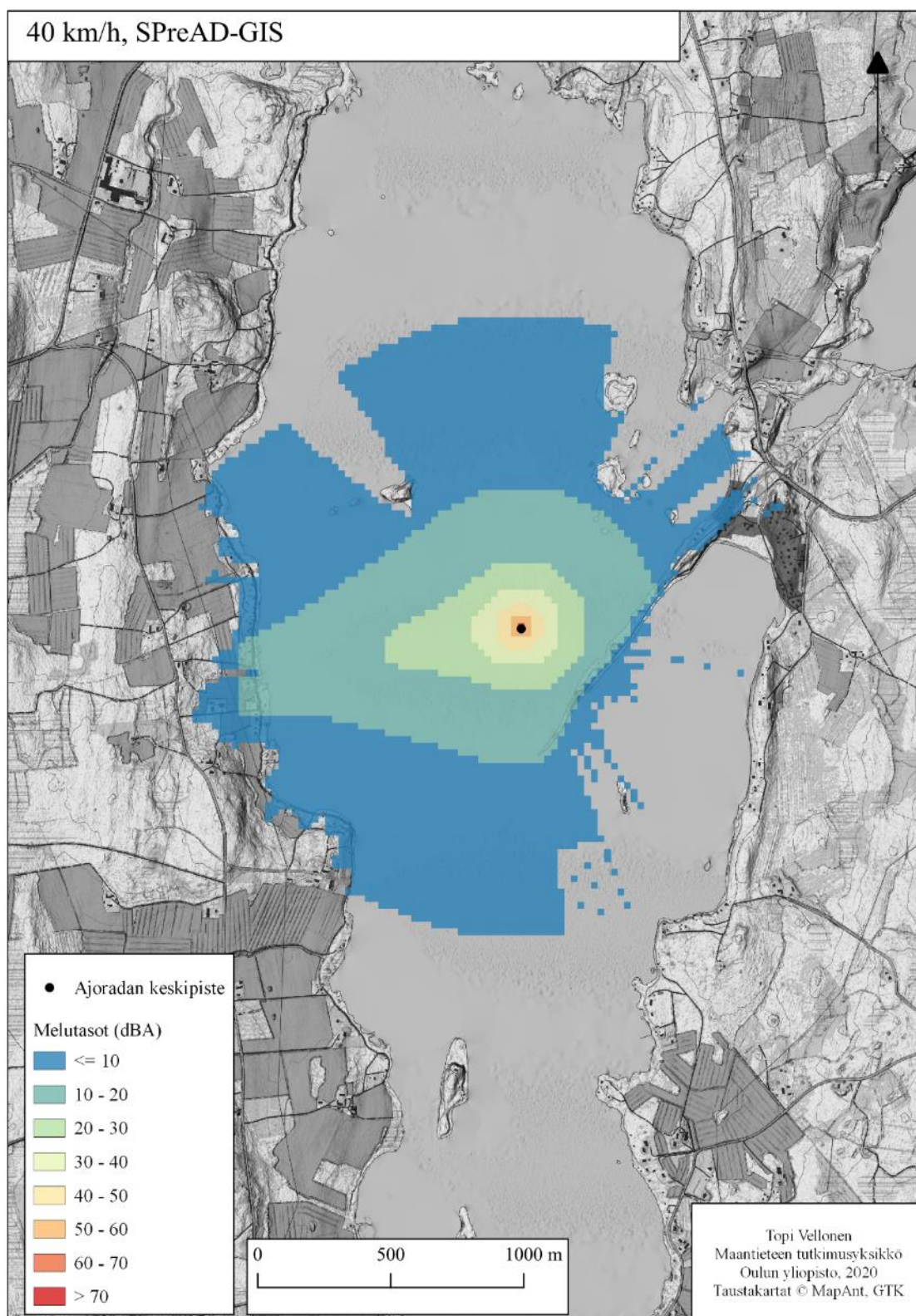
Liite 2. SPreAD-GIS-mallinnus 60 km/h nopeudella Valkiaisnevalla.



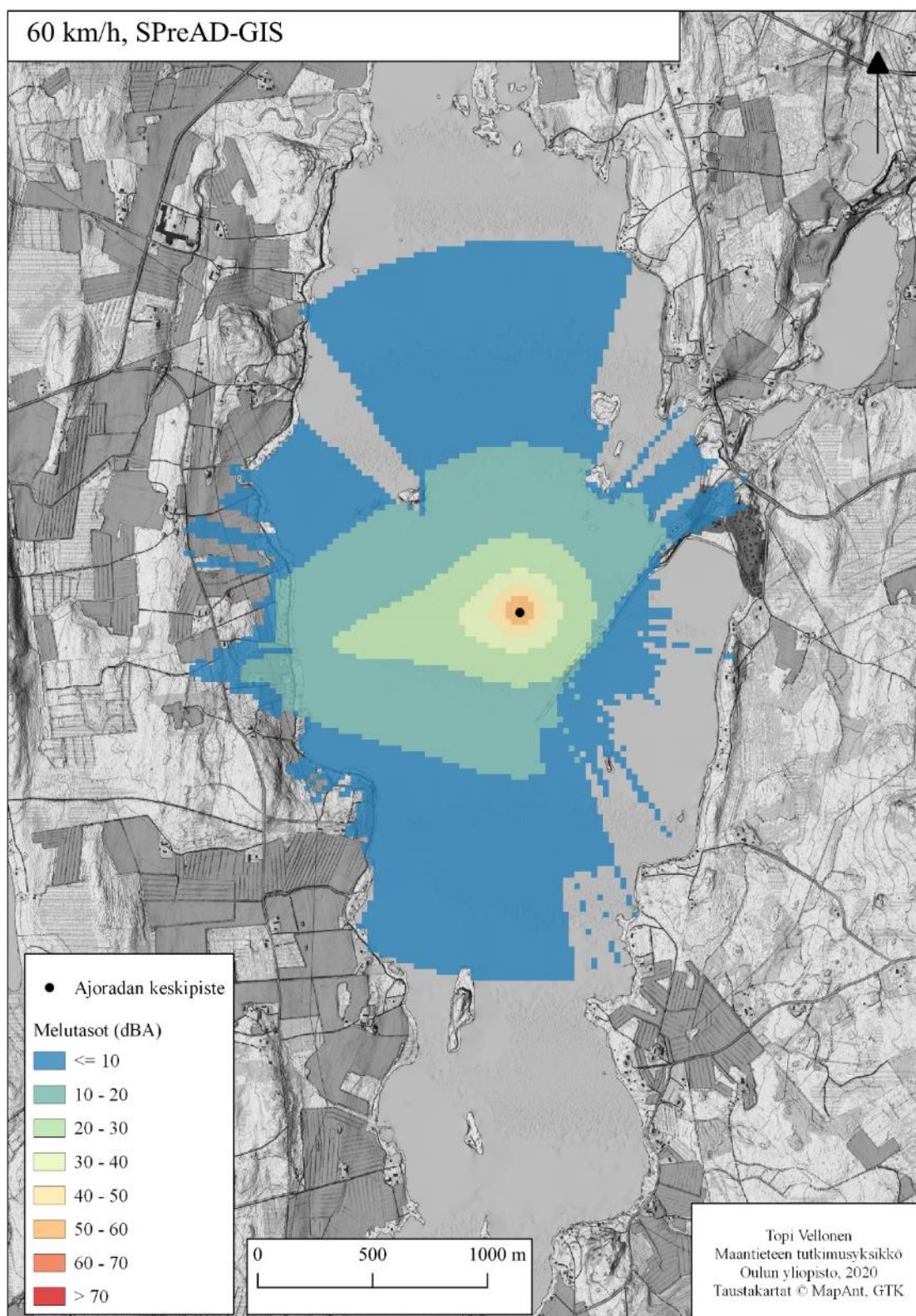
Liite 3. NMSIMGIS-mallinnus 40 km/h nopeudella Valkiaisnevilla.



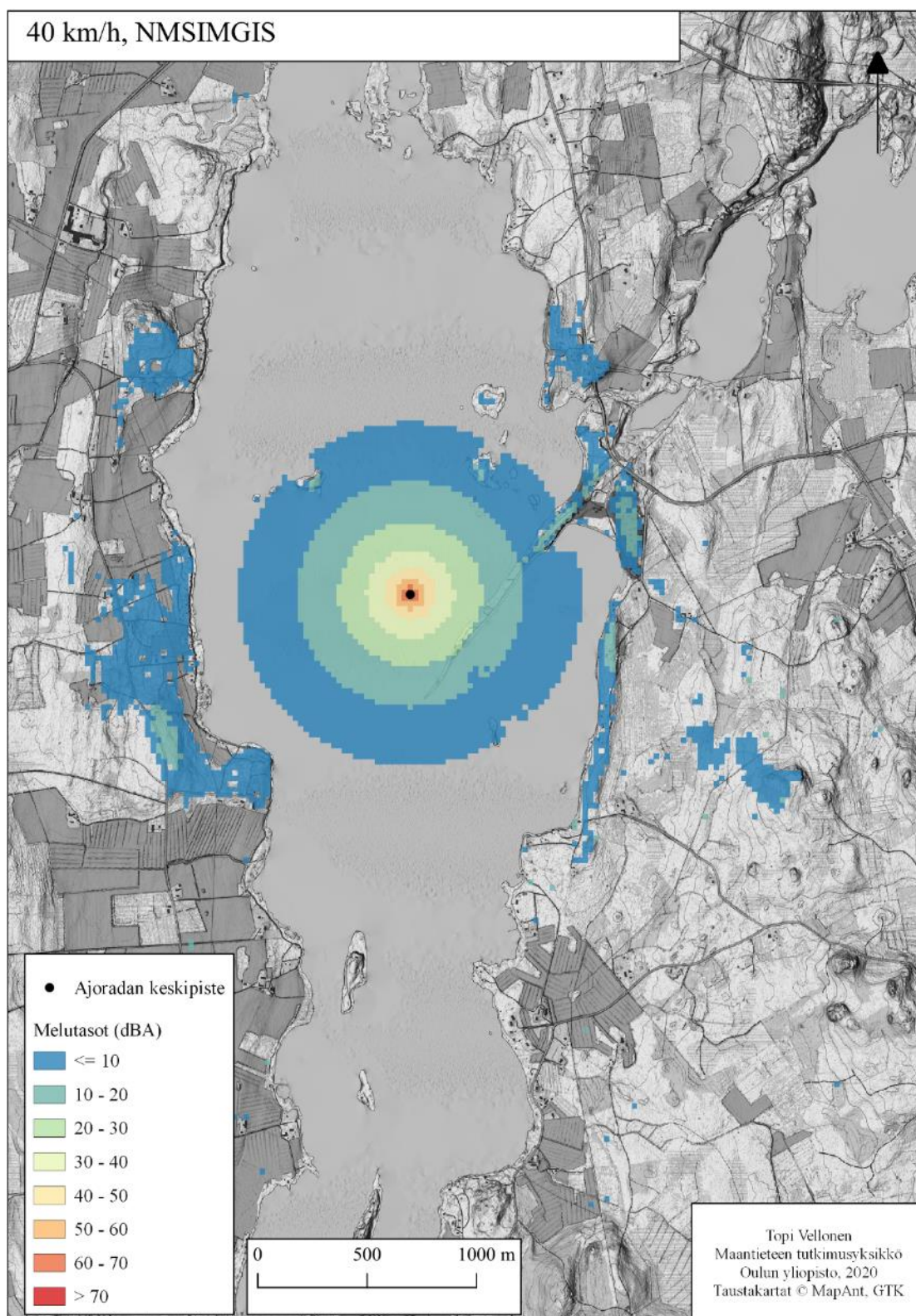
Liite 4. NMSIMGIS-mallinnus 60 km/h nopeudella Valkiaisnevilla.



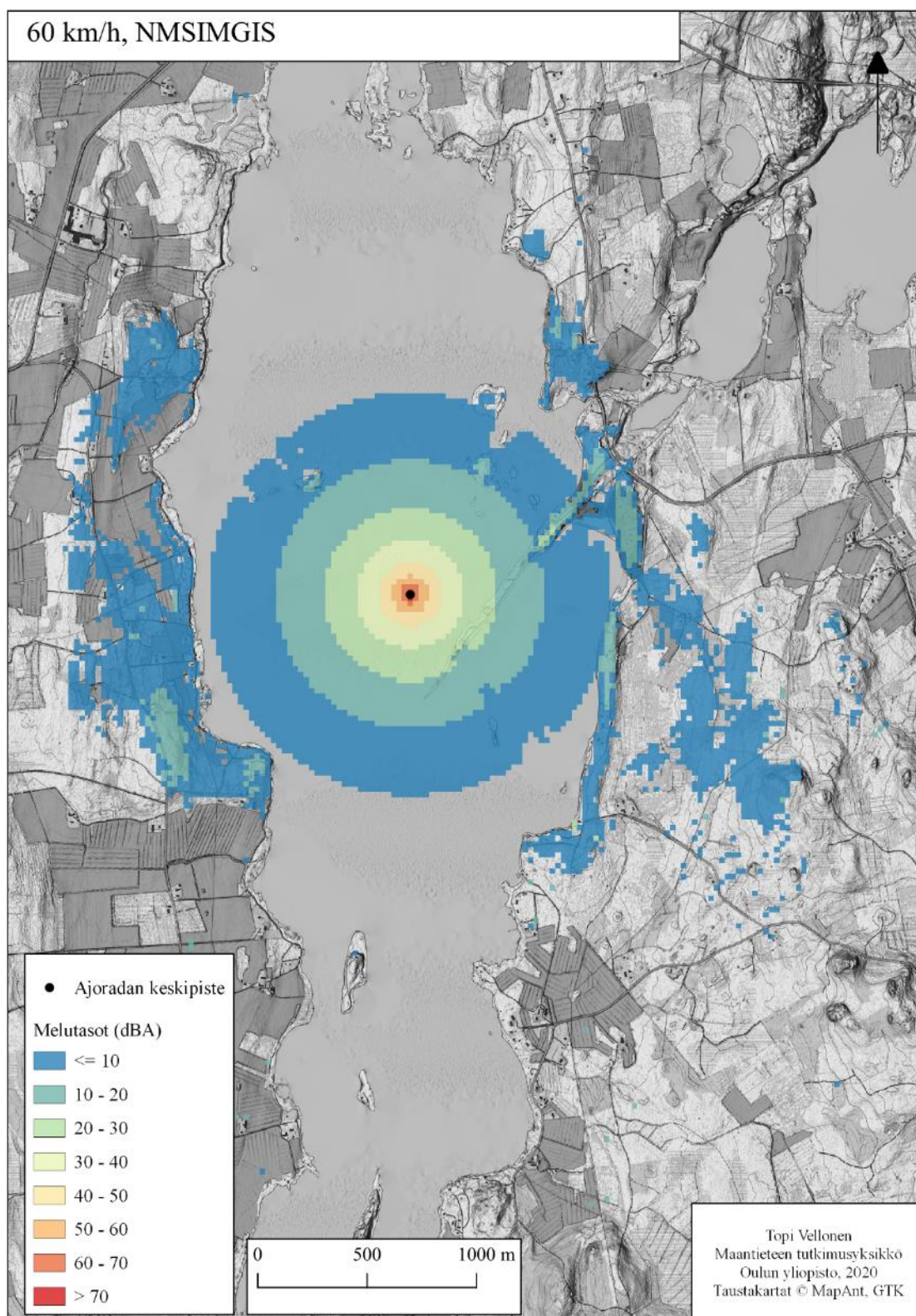
Liite 5. SPreAD-GIS-mallinnus 40 km/h nopeudella Kankarinjärvellä.



Liite 6. SPreAD-GIS-mallinnus 60 km/h nopeudella Kankarinjärvellä.



Liite 7. NMSIMGIS-mallinnus 40 km/h nopeudella Kankarinjärvellä.



Liite 8. NMSIMGIS-mallinnus 60 km/h nopeudella Kankarinjärvellä.